ENCYCLOPÉDIE SCIENTIFIQUE

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION DU Dr TOULOUSE

BIBLIOTHÈQUE D'ASTRONOMIE ET DE PHYSIQUE CÉLESTE

DIRECTEUR J. MASCART

Les

Théories Modernes du Soleil

PAR

J. BOSLER

OCTAVE DOIN & FILS, EDITEURS, PARIS

P.M. TEQUEM
BOOKSELLER
PARIS 18 RUE SCRIBE
NEW YORK 16 BEAVER ST

Octave DOIN et Fils, éditeurs, 8, place de l'Odéon, Paris.

ENCYCLOPÉDIE SCIENTIFIQUE

Publiée sous la direction du Dr TOULOUSE

BIBLIOTHÈQUE

D'ASTRONOMIE ET PHYSIQUE CÉLESTE

Directeur : **J. MASCART**

Astronome à l'Observatoire de Paris.

L'astronomie est, assurément, la plus troublante des sciences, celle qui sut mettre en jeu, depuis la plus haute antiquité, les réflexes humains les plus mystérieux, l'angoisse de l'indéfini, et l'angoisse du temps. Si les phénomènes extérieurs n'avaient pas imposé à l'esprit la nécessité d'un milieu, d'un espace, dont ils sont en même temps et la condition et la conséquence; si, par là, ces phénomènes ne s'étaient pas montrés réciproquement dépendants, le monde n'eût été pour l'homme qu'un état de réalité apparente, et sans répercussion possible sur l'individu.

Mais il en est autrement : les manifestations célestes, ou atmosphériques, sont trop absolues, trop douloureuses, pour ne pas imposer une nécessité objective, matérielle. Et l'homme eut recours à l'étude des faits — dans le but non dissimulé de les prévoir.

Il s'agissait donc, tout d'abord, de fixer les positions des objets et d'en étudier les variations possibles; de préciser, dans le temps, la situation des singularités célestes pour en

prédire le retour : et, à cet égard, la persévérance et l'habileté des anciens restent, à l'heure actuelle, des objets dignes d'admiration. L'astronomie de position, depuis la plus haute antiquité, fut l'objet unique et assez vaste de la curiosité : ses développements incessants, sauf en ce qui concerne un moyen âge ténébreux, imposent à Képler une nouvelle conception mécanique et font, à la fin du XIX^e^ siècle, un véritable monument d'observations patientes et précises.

A côté de la voie principale, quels ne sont pas les sentiers où il fallut s'engager!

L'exécution des calculs numériques tint bientôt une place prépondérante et nécessita les travaux les plus délicats pour être rendue aussi simple, aussi aisée, aussi rapide que possible; l'étude des erreurs, systématiques ou accidentelles, vint dominer l'approximation pour soumettre les méthodes aux procédés d'observation. Ainsi, sans aucun doute, fut créée une science à part, véritable prolongement des mathématiques pures, science du calcul proprement dit : ses principes sont de la plus haute utilité pour tous ceux qui, dans un ordre d'application quelconque, ont à exécuter sur des nombres des opérations plus ou moins compliquées, et les variantes du calcul graphique ou du calcul mécanique sont loin d'avoir donné toute leur mesure.

La mécanique de Newton allait poser à l'analyse pure une des énigmes les plus redoutables de la mathématique, à l'heure même où les physiciens et les artistes devaient rivaliser d'ingéniosité et de talent pour aboutir aux puissantes ressources de l'optique moderne.

Et il ne faudrait pas croire que la géométrie pure, elle-même, soit restée en dehors de cette influence : arpentage dès l'origine, elle tend à la mesure des objets terrestres et de leurs formes, et, sous la pression de l'astronomie, elle engendre bientôt la topographie, la géodésie, avec tout leur appareil de mesures délicates et de calculs très précis.

Est-il besoin de se demander ce que deviendrait le navigateur privé des ressources de l'astronomie? Faut-il s'appesantir sur la répercussion de cette science en ce qui concerne la cartographie, la métrologie, la géométrie perspective ou la métrophotographie, la météorologie ou la sismologie?

Il y a plus encore : la chimie, jusqu'alors écartée, va être interrogée dans son mécanisme le plus intime et le plus profond, et par l'analyse spectrale, et par la photographie. Ce sont les plus profondes transformations, et elles datent d'hier. Non content de l'aspect et des trajectoires des astres, l'astronome veut en sonder la structure, le mécanisme — et l'avenir — par l'analyse spectrale; insatiable dans son besoin de précision, il veut photographier le ciel, le fixer, le figer sur une plaque. Mais, alors, la nature se refuse, la matière se révolte ; l'instrument se cabre devant la précision qu'on lui demande, et mille problèmes nouveaux surgissent pour éviter les plus petites erreurs, pour en trouver l'origine et le remède; le microscope est buté devant le grain de la gélatine, devant la vie même et la transformation du colloïde.

N'est-ce pas là un domaine immense? et qui peut songer à l'embrasser?

Si le développement de l'astronomie est un des plus singuliers, des plus importants et des plus étendus dans la science moderne, les progrès réalisés ont souvent conduit à des révolutions complètes dans les procédés d'observation et de mesure, dans la direction et l'interprétation des expériences; au cours de ces transformations, il y a lutte incessante entre les vieilles et les nouvelles méthodes, les procédés les plus classiques se transforment, les nouvelles recherches apprennent à utiliser au mieux les données empruntées à des sciences lointaines.

C'est pourquoi l'astronome est conduit, malgré lui, à se spécialiser, impérieuse nécessité qui, à côté de quelques avantages, présente de graves inconvénients. Tout d'abord

il abandonne bien des sujets obscurs, sous prétexte qu'ils ne nécessitent pas les puissants instruments modernes; ici, l'amateur éclairé peut apporter un concours précieux, je dirai même indispensable en bien des questions où il faut encore accumuler des observations systématiques. Il n'y a, en effet, aucun fossé, aucune discontinuité entre l'amateur et le professionnel : d'un terme à l'autre de la série, ce doivent être les mêmes principes scientifiques, la même rigueur et la même probité, les mêmes instruments, les mêmes méthodes.

A ignorer entièrement les autres sentiers, chacun risque de peu connaître, de mal comprendre et de mal interpréter sa propre spécialité, de passer à côté du lien qui peut transformer un petit fait scientifique en une découverte utile et féconde; à manquer d'érudition, on ne songe pas assez que, tout à coup, le perfectionnement d'un détail peut ramener au premier plan une expérience qui était presque tombée dans l'oubli. Il est souvent utile de bien se souvenir pour bien prévoir.

Puis, de plus en plus, il faut gagner du temps : entre tous les procédés connus, entre tous les instruments si variés, parmi les méthodes si diverses d'observation, de calcul et de réduction, comment choisir le processus le plus sûr, le plus simple et le plus rapide, le mieux approprié au but poursuivi ? Comment avoir une vue d'ensemble immédiate sur l'enchaînement naturel et logique des divers phénomènes, pour comprendre le développement des idées, la genèse des hypothèses, leurs défauts, leurs qualités et leurs nécessités ?

Il est grand temps, aujourd'hui, de décrire l'état des procédés utilisés dans les différentes branches, de les soumettre à une critique sévère, de les mettre au point avec leurs avantages et leurs inconvénients.

L'Encyclopédie s'impose.

En effet, nul ne peut plus songer à écrire un traité d'en-

semble : dans un ouvrage volumineux, aussi bien, chacun dégagerait difficilement la spécialité qui l'occupe. D'autre part, il ne fallait pas découper l'astronomie en sujets trop restreints : si chacun veut aller au plus pressé pour se familiariser avec les méthodes spéciales, avec les procédés très particuliers, il faut se garder de perdre de vue un ensemble assez étendu; car, dégagées de tout cadre, les recherches risqueraient d'apparaître comme des petites pièces détachées, sans lien, insuffisantes pour construire un véritable monument scientifique.

C'est à des desiderata aussi complexes que va s'efforcer de répondre cette Encyclopédie.

Par sa partie générale, elle s'adresse à tous les savants non spécialisés dans les études astronomiques, mais désireux d'en connaître l'histoire et l'évolution, les méthodes et les résultats; aux amateurs, à tous ceux qui étudient une branche connexe de la science, elle servira de guide pour indiquer tous les écueils sur les routes déjà parcourues; aux maîtres de l'enseignement, elle sera d'un secours indispensable, épargnant la perte de temps et les recherches pénibles sur lesquelles doit s'appuyer la synthèse, leur évitant de quitter le contact avec les progrès constants et les plus récents qui sont répartis en de lointaines publications; aux élèves, elle fournit un enseignement écrit précieux, une initiation aux méthodes expérimentales et aux discussions fécondes de la science moderne.

Les professionnels auront tout à gagner à suivre une telle publication : par suite de la pénétration réciproque et nécessaire des sujets, certaines questions sont appelées à être envisagées dans des volumes distincts, sous des points de vue d'autant plus fructueux qu'ils seront plus différents; et, tout en élargissant ainsi le champ de leur action, les astronomes se réjouiront de trouver, sur chaque objet, une bibliographie complète et précise qui leur évitera bien des ennuis.

Tel est le plan : il restait à le réaliser.

Ici, les difficultés ne font point défaut, et l'exposé de ce que nous avons voulu faire nous sera une excuse pour les inévitables imperfections. En premier lieu, il fallait imaginer une subdivision un peu arbitraire : elle a été faite pour le mieux, de sorte que chaque volume renferme un ensemble assez étendu. Peut-être telle question, *à la mode* aujourd'hui, paraîtra-t-elle sacrifiée vis-à-vis de telle autre dont l'intérêt nous *semble* épuisé ; mais on voudra bien convenir, en revanche, que le passé même des vieux problèmes porte en lui son enseignement et mérite une étude critique. En second lieu, tous les livres de cette classification ne présentent pas le même caractère d'urgence : en tenant compte des autres publications, des ouvrages récents, nous avons cru préférable de différer, pour l'instant, quelques-uns de ces volumes, qui viendront plus utilement à un autre moment.

Au milieu d'intérêts si divers et d'une satisfaction malaisée, nous avons adopté le plan ci-joint, soutenus uniquement par l'espoir de collaborer à une œuvre logique et utile.

Les volumes seront publiés dans le format in-18 jésus cartonné ; ils formeront chacun 350 pages environ avec ou sans figures dans le texte. Le prix marqué de chacun d'eux, quel que soit le nombre de pages, est fixé à 5 francs. Chaque volume se vendra séparément.

Voir, à la fin du volume, la notice sur l'ENCYCLOPÉDIE SCIENTIFIQUE, pour les conditions générales de publication.

TABLE DES VOLUMES

ET LISTE DES COLLABORATEURS

*Les volumes publiés sont indiqués par un *.*

1. **L'Astronomie :** Vulgarisation générale.
2. **Histoire de l'Astronomie.**
3. **Histoire et rôle des observations astronomiques**, par J. Chatelu, Astronome à l'Observatoire de Paris.
4. **Astronomie sphérique.**
5. **Astronomie de position.**
*6. **Observations méridiennes**, 2 volumes, par F. Boquet, Astronome titulaire à l'Observatoire de Paris.
7. **Observations extra-méridiennes.**
8. **Optique astronomique.**
9. **Calcul des Orbites et Éphémérides**, par Luc Picart, Directeur de l'Observatoire de Bordeaux.
10. **La Mécanique céleste.**
11. **Calcul des perturbations.**
12. **Théorie de la Lune et des Satellites.**
13. **Attraction universelle.**
14. **La Terre.**
15. **Le Soleil.**
*16. **Les Théories du Soleil**, par J. Bosler, Astronome à l'Observatoire de Meudon.
17. **La Lune et les Marées.**
18. **Les Éclipses.**
19. **Mesure du temps.**
20. **Les Étoiles simples.**

21. **Étoiles multiples, amas et nébuleuses.**

22. **Les grosses planètes.**

23. **Petites planètes, bolides et étoiles filantes.**

24. **Les Comètes,** par M. Esclangon, Professeur à la Faculté des Sciences de Bordeaux.

25. **Phénomènes singuliers en astronomie.**

26. **Les Constantes astronomiques.**

*27. **Spectroscopie astronomique,** par P. Salet, Astronome à l'Observatoire de Paris.

28. **Photographie astronomique,** par E. Touchet.

29. **La Cosmogonie.**

ENCYCLOPÉDIE SCIENTIFIQUE

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION

du Dr TOULOUSE, Directeur de Laboratoire à l'École des Hautes-Études.

Secrétaire général : H. PIÉRON, Agrégé de l'Université.

BIBLIOTHÈQUE D'ASTRONOMIE ET DE PHYSIQUE CÉLESTE

Directeur : J. MASCART

Astronome à l'Observatoire de Paris.

LES

THÉORIES MODERNES DU SOLEIL

Astron.

LES

THÉORIES MODERNES DU SOLEIL

PAR

J. BOSLER

ASTRONOME A L'OBSERVATOIRE DE MEUDON

Avec 49 figures dans le texte

11683
25-9-11

PARIS

OCTAVE DOIN ET FILS, ÉDITEURS

8, PLACE DE L'ODÉON, 8

1910

Tous droits réservés.

LES

THÉORIES MODERNES DU SOLEIL

CHAPITRE I

THÉORIES GÉNÉRALES SUR LA CONSTITUTION PHYSIQUE DU SOLEIL

INTRODUCTION : RÉSUMÉ DES ANCIENNES THÉORIES JUSQUE VERS 1860

1. — Nous ne nous arrêterons pas sur les idées que pouvaient se faire de notre Soleil les astronomes et les philosophes de l'antiquité ou du moyen âge : la physique solaire, ne l'oublions pas, base nécessaire de toute connaissance positive des choses, ne date, en effet, que de l'invention des lunettes, autrement dit de la fin du XVI^e^ siècle. Les Grecs, Hipparque, Ptolémée, les Arabes et leurs rares émules d'Occident devaient borner leurs ambitions au champ déjà suffisamment vaste de l'astronomie de position, et si le génie d'un Copernic pouvait, dans un effort de logique, concevoir le véritable système planétaire, il était en revanche aussi hors d'état de se représenter un peu clairement le Soleil lui-même que de prévoir l'anneau de Saturne. Réduits à déclarer

que le Soleil était un « globe de feu », les « Primitifs » de l'Astronomie ne s'aventuraient d'ailleurs guère et les développements astrologiques ou métaphysiques dont ils entouraient parfois leurs conceptions ne sauraient nous intéresser : la philosophie naturelle n'était pas née, et ce que l'on entendait alors par là nous semble aujourd'hui bien souvent un fatras de vaines dissertations indignes même des grands noms de leurs auteurs.

2. **Découverte des taches.** — C'est seulement avec la découverte des taches solaires par *Fabricius* et *Galilée* (1610), que l'on commença à acquérir sur le sujet quelques données nouvelles. Le phénomène intrigua fort les astronomes de l'époque et, après avoir refusé quelque temps d'y ajouter foi, ils se partagèrent en deux camps : les uns attribuant les taches à de petits nuages, les autres à des sortes de scories du genre de celles qu'expulsent les volcans.

Plus d'un siècle s'écoula ensuite sans progrès notable : l'intérêt soulevé par la question parut se ralentir; mais, en 1769, *A. Wilson*, professeur à l'université de Glasgow, entreprit d'étudier avec soin l'apparence d'une grande tache qui se montra cette année-là. Il put la suivre dans sa marche vers le bord ouest de l'astre, et la voir apparaître sur le bord est après sa disparition derrière le globe solaire. Il fut très frappé[1] de l'effet de perspective bien connu à présent, quoique encore discuté, qui semblerait indiquer que les taches sont des excavations creusées dans la photosphère. A la

[1] *Phil. Trans.*, vol. LXIV, part. 1, p. 7-11.

vérité, Wilson n'était pas le premier à avoir noté l'apparence creuse des taches : les derniers travaux du *P. Scheiner*[1], entre autres, la faisaient déjà pressentir. Mais les observations modernes montrent cependant que le phénomène est loin d'offrir toujours un aspect aussi décisif.

Ce fut Wilson qui introduisit le premier dans la

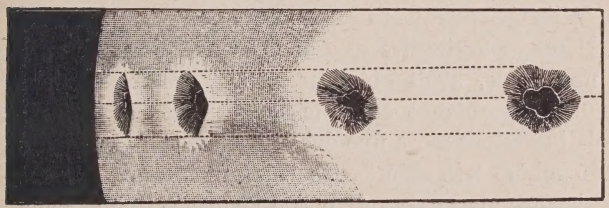


Fig. 1. — Taches et facules brillantes au centre et au bord du Soleil.

science l'idée d'un noyau central solide et obscur entouré d'une sorte d'atmosphère incandescente et lumineuse[2]. Cette enveloppe, que nous appelons maintenant la photosphère, serait la source des radiations solaires. Les excavations constituant les taches pourraient alors avoir pour origine des éruptions de gaz du noyau à travers la matière pesante de la photosphère.

3. **Théories de Herschel.** — Les théories solaires de Wilson n'étaient, de son propre aveu, que des essais. Quelque temps après, Herschel fonda sur ces premières indications la théorie qui fut longtemps en honneur jusqu'aux découvertes spectroscopiques, et survécut même de longues années après.

[1] Schellen, *Die Spectralanalyse*, Bd II, p. 56; 3e édit.
[2] *Rosa Ursina*, livre IV, p. 507.

Que l'on se figure un globe froid, obscur, couvert de montagnes et de vallées, revêtu d'une végétation luxuriante et abondamment peuplé, protégé par une épaisse couche de nuages contre le rayonnement intolérable des régions lumineuses supérieures : tel était le riant tableau que le grand *Herschel* nous faisait du Soleil en 1795 [1]. On voit qu'il avait ajouté, aux idées de Wilson, quelques hors-d'œuvre.

Il est juste de dire que cette conception, singulière à nos yeux, avait pour Herschel l'avantage d'écarter toute dissemblance entre le Soleil et les planètes : le Soleil devenait alors une énorme planète pourvue d'une atmosphère très chaude ; sa rotation autour de son axe, l'existence de la pesanteur à sa surface étant, dans la pensée de l'illustre astronome, autant d'arguments en ce sens, la présence des habitants s'en déduisait, par analogie, comme fort probable. Beaucoup des faits invoqués par Herschel sont exacts ; c'est leur interprétation qui ne l'est pas. Les nuages photosphériques existent, nous le verrons, bien réellement. Herschel reconnut l'aspect rugueux, en « peau d'orange », de la surface solaire, attribua les facules à des éminences de la photosphère agitée et émit l'idée que les taches pourraient bien provenir d'un excès d'émission lumineuse des régions voisines. Il supposait, comme

[1] *Phil. Trans.*, vol. LXXXV, 1795, p. 63. Déjà, à la vérité, quelques astronomes avaient émis des idées analogues. *Flamsteed*, entre autres, dans une lettre à Newton (1681), puis *Bode*, en 1776, étaient arrivés aux mêmes conclusions que W. Herschel sans les développer cependant. Mais ce fut la grande autorité de sir William Herschel qui contribua le plus à les accréditer dans le monde savant.

Wilson, que le noyau laissait transpirer un certain gaz « empyréen » fort léger : en quantités normales ce gaz, se frayant un chemin à travers la photosphère, formait les « pores » qui pullulent sur toute la surface; un dégagement violent du fluide devait donner naissance aux taches et, en se mêlant graduellement aux gaz incandescents supérieurs, entretenir leur rayonnement.

C'était pressentir que la radiation solaire est entretenue par la circulation intérieure de la masse, idée que nous retrouverons dans les écrits plus modernes (Helmholtz, Faye, Thomson). Mais Herschel était, là, en avance sur son temps, et ses contemporains ne retinrent de ses idées que ce qu'elles avaient de plus frappant et aussi de plus faux : la conception d'un globe obscur et froid protégé intérieurement contre une atmosphère éblouissante rayonnant au dehors. *Lalande* se montra cependant réfractaire et préféra assimiler les taches à des montagnes solaires se projetant au-dessus d'une mer de flammes : des îles dans un océan. La pénombre ne serait autre que les flancs en pente de ces montagnes vues à travers les flammes. Disons tout de suite que les mouvements propres observés des taches, et surtout ceux de ces mouvements qui sont irréguliers, s'opposent à cette explication que semblaient autoriser les apparences.

4. — Toutes ces comparaisons hasardées eurent cependant le bon côté d'attirer l'attention des savants et de servir de base aux recherches ultérieures, ce qui doit être un des principaux buts de toute bonne hypothèse scientifique. Comme le fait fort bien remarquer

miss Clerke[1] en citant le chancelier Bacon : « La vérité sort plus aisément de l'erreur que de la confusion. »

Le fils et successeur de *W. Herschel, sir John,* reprit à son tour la théorie de son père et, dans cet ordre d'idées, en notant l'étroit rapport des taches solaires et de la rotation de l'astre, fit remarquer leur répartition en deux zones parallèles à l'équateur; il voyait là une analogie frappante avec les phénomènes présentés dans les mêmes régions par l'atmosphère terrestre (vents alizés, etc.). Les taches pouvaient alors être assimilées[2] aux points de la terre où naissent les cyclones : les couches supérieures sont momentanément refoulées par place avec violence, déplaçant ainsi la matière incandescente, et laissent voir la surface opaque du noyau solaire. Ces phénomènes ne peuvent manquer d'être accompagnés de mouvements tourbillonnaires qui, abandonnés à eux-mêmes, se dissipent graduellement d'autant plus vite que leur hauteur est plus faible. Tout ceci s'accorde parfaitement avec l'aspect des taches, avec celui de leurs pénombres qui semblent toujours les précéder et leur survivre. Mais on ne voit guère d'où pourrait bien provenir la différence de température entre les pôles et l'équateur, différence que la comparaison avec la terre postule implicitement et faute de laquelle l'hypothèse faiblit. J. Herschel répondait, il est vrai, que par l'effet de la rotation du Soleil son atmosphère s'aplatit aux pôles et se renfle à l'équateur : elle opposerait alors aux pôles moins de résistance au flux de chaleur; le refroidissement y

[1] Miss Agnes Clerke, *History of Astronomy during the nineteenth century,* 4e édit., 1902, p. 56.

[2] *Résultats des observations faites au Cap,* p. 432, 434, etc.

ferait donc plus de progrès que dans les régions équatoriales. Il n'y a là, hélas! qu'une séduisante illusion : le mouvement de rotation du Soleil est trop lent pour produire dans son atmosphère un aplatissement sensible, et de plus les taches affecteraient, comme les nuages poussés par les vents alizés, une vitesse commune de translation des pôles à l'équateur, ce que l'observation ne confirme en aucune façon. L'objection énoncée subsiste donc dans son entier.

Quant à l'accélération des régions équatoriales[1] qui avait déjà été signalée, J. Herschel était disposé à l'attribuer à un afflux de corpuscules météoriques circulant dans le sens de la rotation et plus vite qu'elle : ces corpuscules viendraient frapper l'astre comme le fouet d'un enfant fait tourner le sabot. Malheureusement cette idée, il faut bien le dire, a contre elle l'augmentation séculaire qu'elle imposerait à la masse de l'astre, ce qui, d'après le principe des aires, finirait par occasionner au cours des âges un ralentissement appréciable.

5. **Les éclipses de Soleil.** — Jusqu'ici nous ne voyons pas intervenir les données qu'auraient pu fournir les éclipses de Soleil ; le monde savant fut, en effet, longtemps avant de comprendre l'immense importance de ces phénomènes en ce qui touche la physique solaire. On observait bien cependant les éclipses ; mais principalement dans le but de vérifier les tables et les calculs astronomiques, sans se douter des progrès que leur étude, à d'autres points de vue, pourrait faire effec-

[1] On sait que les taches équatoriales révèlent une période de rotation plus courte que celles des hautes latitudes.

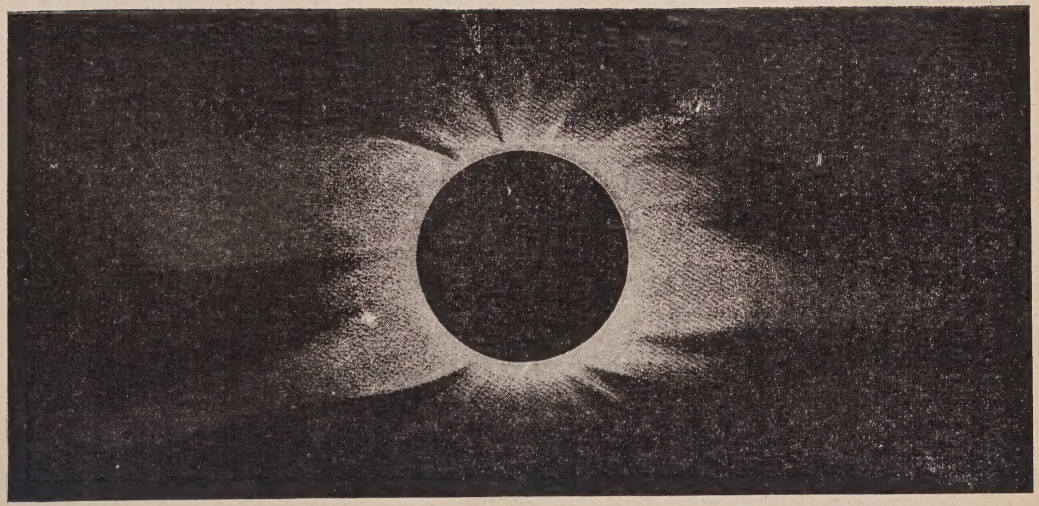


Fig. 2. — Aspect de la couronne durant l'éclipse de 1900, à une époque de minimum de l'activité solaire.

tuer à la science. L'éclipse de 8 juillet 1842, qui fut visible de beaucoup de pays européens, présente à cet égard un intérêt pour ainsi dire historique, car c'est d'elle que datent surtout les observations soignées[1] des protubérances et de la couronne.

6. — Avant cette époque, les opinions sur la question étaient fort partagées. *Képler*[2] considérait la couronne comme due à la diffusion de la lumière solaire par les particules matérielles voisines soit du soleil, soit de la lune. Il penchait cependant pour la première hypothèse; elle contient, nous le verrons, un aspect de la vérité : le spectre à raies noires de la couronne est bien dû à cette cause. *Cassini*[3] attribuait aussi la couronne à « l'illumination de la lumière zodiacale ». D'autres assuraient que le phénomène était d'origine lunaire[4]; on[5] leur objecta que l'anneau lumineux, au lieu de suivre la lune dans son mouvement, semblait au contraire immobile par rapport à elle. L'argument était péremptoire, il n'entraîna cependant pas la conviction. A la même époque, une nouvelle explication[6] avait fait son apparition : celle de la diffraction. La couronne aurait, dans cette hypothèse, été due à une incurvation des rayons lumineux rasant la surface

[1] Le phénomène de la couronne lui-même était anciennement connu, Plutarque même en parle.

[2] *De Stella Nova Op.*, t. II, p. 696-697.

[3] *Mémoires de l'Académie des sciences*, 1706, p. 119.

[4] Le chevalier de Louville, *Mémoires de l'Académie des sciences*, 1715, p. 93-98.

[5] Maraldi, *Mémoires de l'Académie des sciences*, 1715, p. 161, 166-169.

[6] Delisle et Lahire, *Mémoires de l'Académie des sciences*, 1715, p. 161, 166-169.

de la lune. Cette opinion eut un grand succès ; elle prévalut jusqu'à l'époque où *Brewster*[1] démontra qu'aucun effet de cette nature ne serait appréciable à la distance qui nous sépare de la lune. Enfin un autre astronome, *Don José de Ferrer*, prouva, en 1806, que si la couronne était une atmosphère de la lune, sa hauteur devrait être 50 fois plus forte que celle de l'atmosphère terrrestre. Et il ajoutait, avec la vraisemblance de son côté, qu'une pareille atmosphère ne saurait appartenir qu'au Soleil[2]. On voit donc que le terrain était déjà bien déblayé lors de l'éclipse de 1842 ; ce ne fut cependant, comme nous le verrons, qu'à l'éclipse de 1869 que la controverse fut réglée définitivement.

7. — En 1842 également, les savants commencèrent à donner aux protubérances de la chromosphère l'attention qu'elles méritaient. Ces apparences semblent avoir été mentionnées pour la première fois en 1706[3], dans une lettre du capitaine *Stannyan* à Flamsteed ; les protubérances en particulier furent observées depuis par de nombreux astronomes ou navigateurs, parmi lesquels *Don Antonio d'Ulloa*. Mais c'est l'abbé *Peytal*[4] qui, lors de l'éclipse de 1842, reconnut dans les lueurs rouges de la totalité une troisième enveloppe solaire lumineuse par elle-même formant des amas de hauteurs prodigieuses et analogues aux

[1] Miss Clerke, *History of Astronomy*, p. 67.
[2] *Trans. Am. Phil. Soc.*, vol. VI, p. 274.
[3] *Phil. Trans.*, vol. XXV, p. 2240. Le *P. Secchi* cite cependant un passage d'une vieille chronique d'après lequel on aurait remarqué le phénomène en 1239.
[4] *Annuaire des Longitudes*, 1846, p. 439 et 460.

nuages roses de nos couchers de soleil. Cette décou-

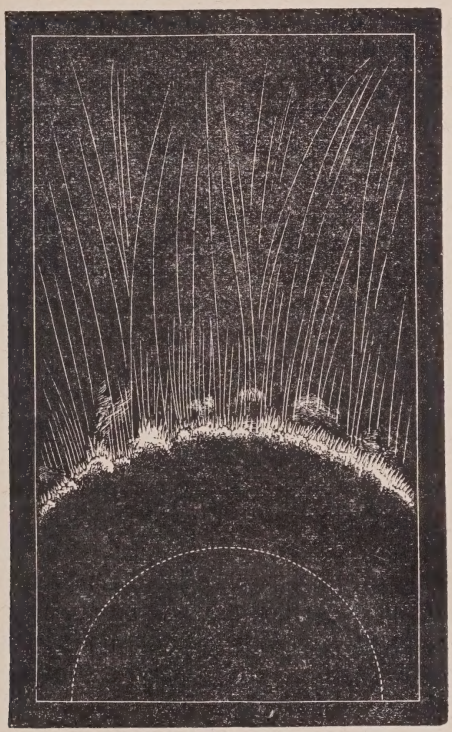


Fig. 3. — Constitution schématique du Soleil montrant : 1° la photosphère brillante ; 2° la chromosphère et les protubérances ; 3° la couronne.

verte importante était sans doute fondée sur une observation de *Bérard* à Toulon[1], où celui-ci vit durant

[1] *Annuaire des Longitudes*, 1846, p. 416.

l'éclipse un croissant rouge très fin, dentelé, encerclant la lune.

Enfin le vrai caractère d'atmosphère solaire de la chromosphère ne fut véritablement indiscuté, reconnu de tous, qu'à la suite des travaux de *Grant*, *Swan*, *Littrow* et surtout du *Père Secchi*[1].

8. — Toutes ces découvertes n'empêchèrent pas la théorie de Herschel de continuer à jouir de la créance presque générale. Mais les difficultés s'accumulaient autour d'elle; elle ne fut pourtant définitivement rejetée que bien des années après.

C'est ainsi, par exemple, qu'Arago lui prêta l'appui de sa haute autorité et, en 1872 encore, *Vicaire*[2] s'en déclarait partisan. Il considérait que la principale objection rencontrée par la théorie de Herschel était que le noyau relativement froid aurait dû, de toute façon, acquérir avec le temps la température de la photosphère incandescente. Il admit alors que la chaleur du noyau est employée à vaporiser les liquides dont il est formé et que, d'autre part, le Soleil avait seulement dû éclairer, tel que nous le voyons, les périodes géologiques les plus récentes, ce qui militait contre les températures excessives admises par les savants étrangers. La note de Vicaire n'a plus, bien entendu, aujourd'hui qu'un intérêt historique; nous ne la citons que pour montrer la faveur tenace des idées de Herschel.

9. **Découvertes de Kirchhoff.** — Cependant, au commencement du siècle, une belle découverte

[1] *Le Soleil*, t. I, p. 386.
[2] *C. R.*, t. CLXXV, 1872, p. 527.

avait été faite : celle des raies du spectre solaire par *Fraunhofer*, et vers 1860 parut enfin le mémoire capital de *Kirchhoff* et *Bunsen* sur la loi de l'absorption des gaz incandescents[1]. Cette loi est aujourd'hui la base des recherches spectroscopiques[2]; son exactitude *qualitative*, en ce qui concerne la lumière, n'est pas discutée. C'est en se basant sur les résultats bruts de ses recherches que *Kirchhoff* fonda sa théorie du Soleil, que nous pouvons considérer comme la première des théories modernes. Toutefois, bien qu'elle repose sur des travaux physiques de la plus grande valeur, et malgré la vraisemblance que pouvaient avoir, il y a cinquante ans, les idées fondamentales proposées alors, elles ont été réfutées depuis presque entièrement; aussi insisterons-nous peu sur la théorie personnelle de Kirchhoff; nous nous bornerons plus loin à résumer celle de Zöllner, qui reprit plus tard à son compte presque toutes les idées de l'illustre physicien de Berlin.

10. **Progrès de la spectroscopie.** — Quoi qu'il en soit, un grand pas fut également fait vers la même époque; par l'identification systématique de la plupart des raies du spectre solaire, on reconnut dans le Soleil la présence d'un grand nombre de corps ter-

[1] *Abhandlungen*, Berlin, 1861, p. 77; *Annalen der Physik*, Bd CXIX, p. 275. On sait que la loi de Kirchhoff est ainsi conçue : Une vapeur incandescente absorbe les radiations qu'elle est capable d'émettre et tend à substituer son intensité propre à celle de la lumière qui la traverse. Elle laisse passer sans les modifier les autres radiations.

[2] Voir **E. S.**, P. Salet, *Spectroscopie astronomique*, ouvrage auquel nous renvoyons d'une manière générale en ce qui concerne la spectroscopie solaire.

restres, et comme la spectroscopie stellaire avançait *pari passu,* l'identité générale de composition chimique de l'univers devenait vraisemblable; c'est là un point que toutes les conceptions actuelles sur le Soleil regardent comme acquis, et son importance philosophique est de premier ordre. Aussi verrons-nous, avec les découvertes de Kirchhoff, les anciennes théories toujours assez spéculatives céder la place aux nouvelles, plus généralement étayées par l'expérience malgré la part d'hypothèse toujours bien grosse qu'elles contiendront longtemps encore, si ce n'est toujours.

Il est juste de dire cependant que, de tous les instruments employés à l'étude du Soleil, c'est du spectroscope que nous avons, selon toute probabilité, le plus à attendre; bien souvent en effet son emploi judicieux, la mise en œuvre d'une dispersion plus forte permettent de faire quelque observation excluant telle ou telle théorie, et ensuite d'opérer parmi les autres un triage de plus en plus minutieux : grâce à cet appareil la physique solaire progresse ainsi pas à pas, lentement peut-être, mais sûrement.

THÉORIE DE ZÖLLNER

1. — Cette théorie a été émise vers 1870 par *Zöllner,* professeur à Leipzig, qui se borna, nous l'avons vu, à perfectionner et à développer les idées de Kirchhoff ; elle repose sur des prémisses considérées aujourd'hui comme fausses; cependant l'apparente rigueur de ses raisonnements lui prête un certain attrait et elle contient sans doute bien des parties exactes : nous l'étudierons donc en la résumant.

Zöllner s'en tient[1] à la conception de Kirchhoff : les raies de Fraunhofer attestent l'existence d'une couche absorbante relativement froide et, — chose que l'on n'admet plus, — la source de lumière continue qui donne naissance à ces raies est un liquide incandescent. C'est cette source que nous appelons la photosphère ; au-dessus d'elle se trouve une atmosphère gazeuse, incandescente aussi, parsemée de nuages en suspens analogues à nos cumulus. La photosphère elle-même ne serait qu'une couche liquide fort mince reposant sur un noyau solide, lequel, à lui seul, constituerait la presque totalité de l'astre.

Restent à expliquer avec ces hypothèses les apparences connues.

2. **Les taches.** — Occupons-nous d'abord des taches. Celles-ci sont, pour Zöllner, constituées par des produits de condensation résultant d'un refroidissement local et irrégulier de la surface solaire. Quelle est maintenant la cause de ce refroidissement lui-même et comment ses effets peuvent-ils se faire sentir pendant tout le temps qu'une tache déterminée reste visible, c'est-à-dire souvent des semaines et des mois? Un refroidissement peut avoir deux origines : soit le contact d'un corps plus froid, soit une augmentation du rayonnement. La première alternative est peu vraisemblable : les couches extérieures, plus exposées à la déperdition calorifique, sont les plus froides; elles devraient redescendre vers des régions où elles seraient très probablement comprimées, ce qui aurait pour effet de les

[1] Voir Scheiner, *Populäre Astrophysik*, p. 403.

réchauffer[1] et partant de leur faire perdre presque toute action réfrigérante. L'idée d'une augmentation du rayonnement est donc la seule admissible; encore faut-il lui trouver une raison.

Zöllner imagine celle-ci : la présence de l'atmosphère solaire doit modifier l'intensité de rayonnement photosphérique comme l'atmosphère terrestre le fait pour notre planète. Quand l'air est pur et sans nuages la température baisse beaucoup pendant la nuit par suite du rayonnement, c'est alors qu'apparaissent la rosée et le givre. Des phénomènes analogues doivent se passer sur le Soleil. Mais lorsque le manteau de nuages recouvrant le Soleil s'éclaircit ou se dissipe même entièrement par places de façon à laisser voir le noyau, ou tout au moins les couches plus profondes de l'astre, on ne doit pas s'attendre à observer, si l'on ne fait pas d'autre hypothèse, un phénomène bien net ni surtout bien constant. La loi de *Kirchhoff* ne nous dit, en effet, nullement que l'interposition d'une vapeur incandescente relativement froide entre notre œil et une source lumineuse a *nécessairement* pour effet d'obscurcir celle-ci. L'éclat plus grand des couches internes du soleil peut fort bien être diminué par les nuages de l'atmosphère solaire, mais on ne peut rien affirmer *a priori :* c'est pourquoi Zöllner suppose le noyau de la tache constitué par des sortes de scories solides qui se formeraient à la surface de la photosphère liquide par suite du refroidissement.

Il est alors aisé de comprendre pourquoi la tache ainsi engendrée tend à durer un certain temps. Con-

[1] Comparez plus loin : Théorie d'Oppolzer, p. 56.

sidérons trois sphères chaudes identiques, mais d'état physique différent : liquide, solide et gazeux. Si chez toutes les trois on fait naître quelque part un même abaissement de température, celle sur laquelle l'équilibre thermique se rétablira le plus lentement sera la sphère solide, et ce en raison des courants de convection qui parcourront les deux autres.

L'état solide est donc, pour Zöllner, le plus vraisemblable en ce qui touche le noyau des taches ; lui seul rend compte, à son avis, de leur persistance. A côté des régions froides du noyau, des courants gazeux descendants se forment sur tout le bord de la tache et donnent naissance à la pénombre. Si la tache nous paraît sombre, c'est à sa température relativement basse qu'elle le doit; quant à son aspect en forme d'entonnoir, — aspect constaté si souvent depuis Wilson, — il est la conséquence des courants de haut en bas qui l'environnent.

3. **Périodicité des taches.** — Zöllner a cherché à expliquer la périodicité des taches solaires[1]. En premier lieu, les circonstances qui favorisent la production d'une tache peuvent en faire naître plusieurs, car elles ne se limitent sans doute pas à la place occupée par le noyau, mais s'étendent probablement à toute la région environnante. Par contre, il est évident qu'au premier rang de ces circonstances favorables figure la tranquillité de l'atmosphère solaire et que les courants produits par une tache tendent à la faire disparaître elle-même. Il en résulte que le phénomène est, de sa

[1] Voir à ce propos le début du chapitre V, p. 245.

nature, intermittent ; mais cela suffit-il pour qu'il y ait une véritable périodicité ? c'est là une autre question que l'auteur aborde ensuite.

Le nombre moyen annuel des taches ou leurs aires totales moyennes devraient normalement être constants et obéir à la loi des grands nombres. Cette constance ne peut disparaître que par suite de deux causes, — abstraction faite des influences extérieures, — 1° la température moyenne de l'astre peut elle-même varier ; 2° les taches peuvent dépendre les unes des autres.

La première cause amènerait, dans le cas d'un refroidissement général, une recrudescence des taches, et, dans le cas contraire, leur disparition totale. Zöllner admet que l'observation conduit à écarter l'idée de variations séculaires de sens déterminé, au moins durant la période historique ; il ne peut y avoir que des changements périodiques. Comme, au moment du maximum de fréquence des taches, la surface solaire semble en révolution, comme les facules et les protubérances [1] y apparaissent en grand nombre, il semble bien que les taches soient dues à des causes générales intéressant l'astre entier : variations de pression et de température qui, éclatant brusquement, tendent ensuite à s'égaliser dans la période qui va du maximum au minimum ; le calme et l'éclaircissement des nuages éruptifs, venant ensuite, favorisent la formation de nouvelles taches et tout recommence. En un mot, Zöllner explique la périodicité des taches par celle de l'activité générale de l'astre, et il faut convenir que

[1] Les protubérances sont, pour Zöllner, causées par des éruptions d'hydrogène à travers la surface liquide de la photosphère.

l'explication est assez faible ; peu de théories cependant se flattent d'expliquer vraiment ce point difficile.

4. **Zones de fréquence des taches.** — La répartition des taches en zones suggère à Zöllner une interprétation assez compliquée. Les couches inférieures

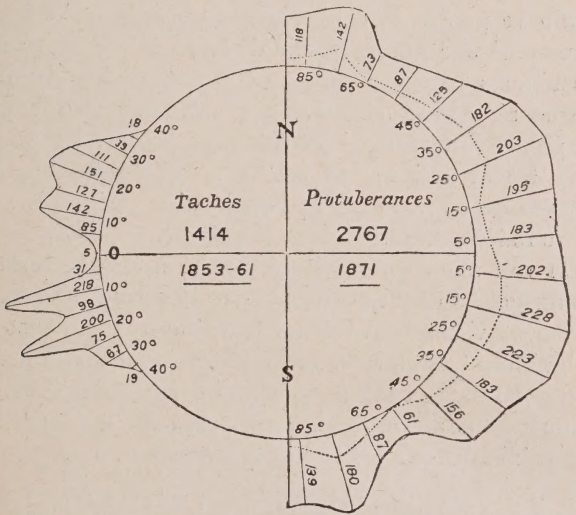


Fig. 4. — Répartition des taches du Soleil et des protubérances en latitude, d'après leurs fréquences.

de l'atmosphère solaire étant fortement chauffées par conductibilité doivent être notablement plus chaudes que les couches hautes, dont le refroidissement est d'ailleurs aussi plus rapide; les premières doivent donc être plus légères. Chez un astre sphérique en repos absolu il y aurait équilibre instable. Or, en vertu de la rotation solaire, la force de la gravité à la surface

dépend un peu de la latitude, et elle est minima à l'équateur ; il doit donc y avoir dans ces régions une tendance particulière des couches inférieures à former des courants ascendants. Ces courants influent alors sur la répartition superficielle des températures : dans leur montée ils se refroidissent par détente et viennent ensuite se perdre dans les régions polaires après avoir abandonné une grande partie de leur chaleur en route. Les régions polaires doivent donc être moins chaudes que les régions équatoriales [1] ; quant aux gaz qui, par les pôles, ont regagné les couches basses, ils poursuivent leur chemin en rasant la photosphère pour émerger de nouveau à l'équateur, et le phénomène se répète indéfiniment.

On voit alors qu'il doit se former à chaque instant des nuages de condensation ; ceux-ci ne sont pas nécessairement visibles, vu leurs températures qui restent malgré tout très élevées. Les régions équatoriales et les hautes latitudes sont donc sujettes à de continuelles perturbations atmosphériques : c'est dans les latitudes intermédiaires que les taches apparaissent.

5. **La rotation solaire.** — L'explication que la théorie donne de la loi de rotation solaire n'a guère qu'un intérêt historique, vu le rôle capital qu'y joue l'hypothèse d'une photosphère liquide. Disons seulement que Zöllner est amené à résoudre mathématiquement le problème suivant : Étant donné un corps solide sphérique en rotation, uniformément couvert d'une couche liquide très mince par rapport aux

[1] La théorie d'*Emden* (voir plus loin, p. 228) arrive à une conclusion opposée. La question n'est pas définitivement tranchée.

dimensions du noyau, on admet que le frottement des molécules de cette couche n'a lieu que dans le sens des parallèles. Si un courant gazeux allant des pôles à l'équateur exerce sur la couche liquide une action de frottement, on demande de trouver la vitesse de rotation d'un point de cette couche en fonction de la latitude. En appliquant au Soleil la solution de ce problème qui, on le voit, résume presque ses idées, Zöllner réussit à retrouver à peu près la loi de rotation découverte par *Carrington* (voir p. 36) ; sa formule est pour le mouvement journalier en longitude solaire X, l étant la latitude :

$$X = \frac{863' - 619' \sin^2 l}{\cos l}.$$

6. **Objections.** — Les diverses explications proposées par Zöllner pour les phénomènes solaires avaient en général pour elles le bon sens et l'observation ; elles n'ont cependant pas eu beaucoup de succès. Il est certain que l'idée d'attribuer les taches à des scories se formant à la surface d'une mer incandescente semble admissible *à priori;* l'hypothèse de *Laplace* sur la formation des planètes ne nous fait-elle pas entrevoir d'une façon analogue la naissance de nos continents ? L'aspect éruptif des protubérances, l'apparence régulière de la photosphère semblent également militer, avec les études spectroscopiques sur les taches, en faveur de Zöllner. Malheureusement, nous l'avons dit, on n'admet plus aujourd'hui qu'il puisse y avoir dans le Soleil une photosphère liquide à température assez basse pour permettre la formation des scories. Ainsi, pour ne donner que la principale raison,

la température de la surface a été trouvée par les observateurs modernes être au moins de l'ordre de 5 000° à 8 000°; or à cette température tous les constituants connus du Soleil sont gazeux. Cependant la preuve de l'impossibilité d'une photosphère liquide ne saurait être strictement faite; malgré son extrême invraisemblance, tirée de prémisses improbables, la théorie de Zöllner n'est pas encore rigoureusement condamnée.

OPINION DU P. SECCHI

1. — Le *P. Secchi,* un des plus éminents astronomes qui se soient occupés du Soleil, a passé une grande partie de sa vie à l'observer minutieusement. Sans avoir échafaudé *ex cathedra* aucune vaste conception d'ensemble, il a interprété les résultats de ses travaux dans divers endroits de ses ouvrages[1]; nous allons résumer ici ces explications, auxquelles la grande expérience de leur auteur donne une valeur indéniable.

2. **Les diverses couches solaires.** — La masse incandescente du Soleil telle que nous le voyons est à l'état de vapeur, et les granulations dont sa surface nous paraît couverte ne sont que les extrémités des flammes de la photosphère, flammes qui jaillissent au-dessus d'une couche absorbante; c'est cette dernière

[1] Voir notamment : Secchi, *Le Soleil,* édition Gauthier-Villars, 1877, p. 282. Le Père Secchi a aussi écrit pour M. Newcomb un résumé reproduit dans l'ouvrage de ce dernier : *Popular Astronomy,* London, Macmillan, 1878, p. 265.

qui constitue, pour ainsi dire, les mailles du fin réseau relativement sombre que nous apercevons entre les « grains de riz ».

Au-dessus de la photosphère se trouvent en premier

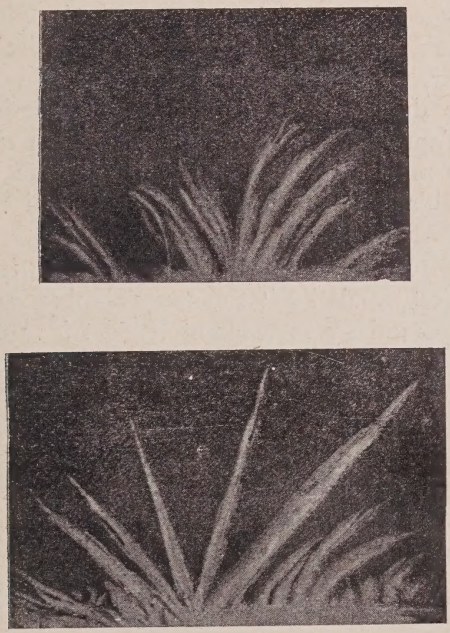


Fig. 5. — Protubérances éruptives, d'après Secchi.

lieu la couche renversante, formée surtout de vapeurs métalliques, puis la chromosphère et la couronne. Les substances constitutives de l'enveloppe solaire paraissent, fait observer Secchi, rangées par ordre de

densité ; la chromosphère renferme, en effet, principalement les corps les plus légers : hélium et hydrogène, tandis que les vapeurs lourdes qui produisent le spectre de *Fraunhofer* sont voisines de la photosphère. Le principal élément de la couronne, le « coronium », est au contraire, selon toutes probabilités, plus léger[1] encore que l'hydrogène. L'atmosphère solaire qu'est la couronne, et qui s'étend apparemment jusqu'à une distance du Soleil comparable à son diamètre, doit aller, d'après Secchi, beaucoup plus loin en réalité ; la lumière zodiacale n'aurait alors pas d'autre origine : c'est d'ailleurs là une opinion souvent admise.

3. **Phénomènes éruptifs.** — L'intérieur du Soleil n'est jamais à l'état de repos absolu ; les diverses substances qui s'y rencontrent tendent à se combiner par suite de l'affinité chimique et produisent ainsi nécessairement, comme dans les réactions effectuées dans nos laboratoires, de violents mouvements convulsifs.

Ceux-ci ont pour effet de soulever à de grandes hauteurs la photosphère et la chromosphère, en donnant naissance à de véritables éruptions et souvent même à des explosions. Les masses d'hydrogène, mêlées à des vapeurs métalliques qui quittent la photosphère à une température supérieure à celle des hautes régions de l'astre, tendent à s'élever davantage, à se

[1] Des raisons spectroscopiques militent aussi en faveur de cette légèreté supposée du coronium (voir, par exemple : Clerke, *Hist. of Astronomy*, p. 192). Bien qu'elles ne fussent pas connues de Secchi, l'argument n'est donc point sans valeur en ce qui touche cet élément.

maintenir même[1] à des altitudes considérables, et forment ainsi ce que nous appelons les protubérances.

Leur structure est entièrement semblable à celle des veines fluides qui, dans un liquide ou dans un gaz non homogène, montent à travers les couches plus légères

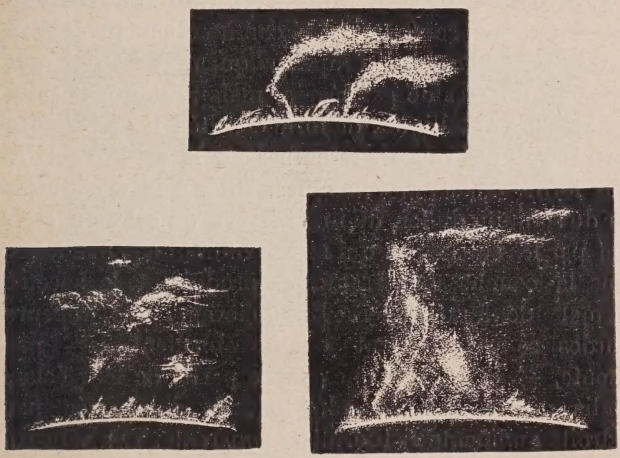


Fig. 6. — Exemple de protubérances quiescentes.

et se diffusent à mesure que le milieu se fait moins dense. Mais l'extrême variabilité des protubérances, même à la partie inférieure, prouve, selon Secchi, qu'il n'y a nullement passage à travers une couche solide résistante, ce qui exclut en particulier toute idée d'une photosphère liquide comme le voulait Zöllner. Les

[1] On leur donne alors le nom de protubérances quiescentes.

vitesses observées sont même telles, que Secchi exprime l'opinion qu'une partie des matières ainsi projetées pourrait bien ne jamais retomber[1] et, lancée au dehors de l'atmosphère solaire, se répandre ensuite dans l'espace interplanétaire.

4. **Formation des taches et des facules.** — Des éruptions se font donc continuellement jour à travers la photosphère, éruptions qui ne sont pas uniquement formées de gaz légers, mais renferment aussi des vapeurs métalliques de forte densité ; nous pouvons parfois voir ces vapeurs retomber sur la surface solaire sous forme de jets paraboliques. Elles sont constituées par du sodium, du fer, du magnésium, du calcium, etc., bref par les substances qui se rencontrent en abondance dans la couche renversante et produisent le spectre normal de Fraunhofer. En s'élevant, ces vapeurs lourdes se refroidissent considérablement, — par détente, — et perdent une grande partie de leur éclat, tandis que l'épaisseur plus grande interposée par endroits augmente l'absorption apparente. Les vapeurs projetées retombent ensuite sur la photosphère et y forment par leur seul poids des cavités qui se trouvent ainsi remplies de matières peu lumineuses et absorbantes. Telle est l'origine des taches solaires[2]. Si l'éruption est instantanée ou du moins très courte, les

[1] Certaines protubérances ont, en effet, des vitesses supérieures à la vitesse critique de 612 kilomètres (voir page 68).

[2] Du moins dans la plus récente théorie de Secchi. Vers 1868, *Secchi* avait publié une autre théorie des taches très analogue à celle que *Faye* proposait à la même époque et que tous deux durent abandonner à la suite de graves objections (voir plus loin, page 43).

vapeurs accumulées de cette façon ne tardent pas à se réchauffer, tandis que les masses brillantes de la photosphère finissent peu à peu par envahir la cavité, dissoudre les vapeurs obscures et faire disparaître la tache. Mais tant que l'éruption dure, le nuage peut continuer à subsister, absolument comme ceux qui

Fig. 7. — Constitution d'une tache solaire, d'après Secchi.
a, nuages photosphériques; *b*, facules; *p*, pénombre; *u*, noyau.

émanent de nos volcans et se maintiennent un certain temps parfois au-dessus des régions ravagées. Il est cependant, nous devons l'avouer, difficile de voir pourquoi cet effet se manifesterait si longtemps à la même place, et pourquoi pendant plusieurs révolutions du Soleil, c'est-à-dire pendant des mois, les vapeurs s'obstineraient à retomber exactement au même endroit. Cette objection n'empêche pas la théorie des taches de Secchi d'expliquer un grand nombre de faits constatés.

5. — Ainsi l'observation nous prouve que les éruptions de la surface accompagnent en général les taches, et qu'elles font défaut aux époques où il n'y a pas de taches. D'ailleurs les facules, éruptions composées principalement, selon Secchi, d'hydrogène, sont là pour le prouver. Toutefois Secchi ne paraît pas attribuer aux facules, dans la formation des taches, toute l'importance qu'elles y ont certainement. Il semble

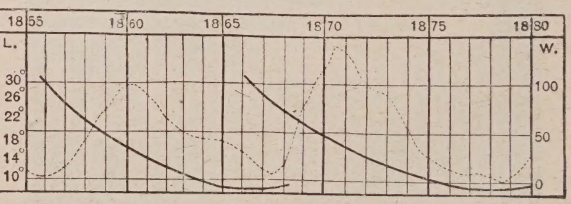


Fig. 8. — Loi de Spörer.
..... Courbe de fréquence des taches (nombres de Wolf W.).
—— Latitude moyenne L des taches.

évident, en effet, et les belles épreuves spectrohéliographiques de MM. *Hale* et *Deslandres* rendent la chose presque indéniable, que les facules et les taches doivent être deux manifestations différentes d'un même phénomène. Quoi qu'il en soit, le Père Secchi considère que le grand éclat des facules est dû à ce que la surface photosphérique se trouve soulevée au-dessus de la couche renversante, laquelle, comme on sait, est d'une minceur extrême (1″ ou 2″ au plus) ; les régions soulevées échappent alors à l'absorption de la couche basse, ce qui les fait paraître plus brillantes. Une autre cause possible est le remous produit par l'hydrogène éruptif dans la couche renversante ; ce gaz plus

transparent, en prenant la place des vapeurs métalliques, nous permet alors de mieux voir la photosphère.

6. — La formation des taches n'est donc qu'un phénomène secondaire qui nous renseigne néanmoins sur les crises violentes de l'intérieur du Soleil : leur fréquence correspondant à celle des éruptions, les deux phénomènes sont des indices simultanés de l'activité solaire. Quant à savoir pourquoi les taches ne se montrent que dans les deux zones tropicales de latitude inférieure à 45°, Secchi admet que l'activité intérieure est plus grande dans ces régions, mais il n'esquisse aucune explication; la cause profonde de la répartition des taches réside d'ailleurs, selon lui, dans des couches solaires inaccessibles à l'observation.

7. **Circulation générale.** — Une masse fluide comme le Soleil, perdant continuellement de la chaleur, ne saurait subsister sans une circulation interne dont nous ignorons les lois.

Cependant on a remarqué que les zones où les taches apparaissent de préférence ne sont pas fixes, mais qu'elles ont un mouvement progressif[1]. Après avoir été très nombreuses dans les basses latitudes, les taches arrivent dans les hautes en se faisant de plus en plus rares pour réapparaître bientôt en foule au voisinage de l'équateur et renouveler le même cycle indéfiniment. Entre deux phases successives du phénomène se trouve généralement l'époque du minimum des taches, tandis que, pendant les périodes de grande activité, les protu-

[1] Ces mouvements ont fait l'objet des travaux de *Spörer*. Voir par exemple, Young, *General Astronomy*, édit. 1904, p. 206.

bérances ont une tendance à se diriger vers les pôles. Tout cela révèle, selon Secchi[1], un mouvement général de la photosphère de l'équateur vers les pôles. Ce mouvement, combiné avec l'accélération bien connue des régions solaires équatoriales dans le sens de la rotation, prend en définitive l'aspect d'un vaste tourbillon. L'auteur italien, qui n'ose préciser davantage, rattache, comme bien d'autres d'ailleurs, l'accélération équatoriale aux conditions initiales de la formation du Soleil.

8. **Opinion sur la température du Soleil.** — Secchi attribuait au Soleil une température qui aujourd'hui nous paraîtrait fort exagérée, au moins à la surface; il croyait la photosphère à plusieurs millions de degrés centigrades. A cette température, il ne pouvait faire autrement que de supposer l'astre entièrement gazeux, excepté peut-être, dit-il, dans les régions internes où la pression due à la gravité excède la force moléculaire de la dilatation. C'est à l'état gazeux des couches extérieures que Secchi attribuait les variations du diamètre solaire plus ou moins établies par certains observateurs. Malgré ces irrégularités, le rayonnement de l'astre varie peu et le refroidissement est très lent. Pour ce qui est des causes pouvant entretenir la radiation, Secchi en relève trois qui, selon lui, concourent à ce résultat : l'énorme quantité de chaleur accumulée à l'origine, la contraction de la masse admise par *Helmholtz*, enfin la chaleur de dissociation due aux actions chimiques dont le Soleil est

[1] Le raisonnement concernant les taches n'est pas très probant.

le siège. Nous reviendrons d'ailleurs, dans un chapitre spécial, sur ces points de la théorie du Soleil.

9. — On le voit, les théories de Secchi serrent de près l'observation, sans trop se hasarder à des hypothèses aventurées ; l'imagination y a peu de part, c'est là sans doute une des raisons qui les font estimer et leur permettent de conserver encore aujourd'hui, sauf ce qui concerne la température de l'astre, un haut degré de probabilité.

THÉORIE DE FAYE

1. **Le Soleil machine thermique.** — La théorie de *Faye*, à l'époque où elle fait son apparition, est la première tentative d'explication du Soleil qui soit vraiment cohérente et qui embrasse la presque généralité des phénomènes[1] ; beaucoup des idées fondamentales, plus hardies que celles de Secchi, qu'il a lancées sont encore admises aujourd'hui, bien que certains points doivent assurément être retouchés. Le Soleil est, pour Faye, une vaste machine thermique rayonnant au dehors son énergie et non plus une masse chaude inerte, et il revient souvent sur cette conception qui reste acquise à la science. Partant de cette idée il se propose[2], par une comparaison systématique entre les faits et les théories physiques mises en avant pour les expliquer, de rattacher les divers phénomènes solaires à quelques lois générales dont ils puissent se déduire logiquement.

[1] Celles de *Secchi* et de *Zöllner* sont en effet postérieures en date aux premières, tout au moins, des Notes de Faye.

[2] *C. R.*, t. LX, 1865, p. 89.

2. **Résultats fondamentaux tirés de l'observation.** — Le premier point qui attire son attention est l'apparence des taches solaires, et il pense, avec d'ailleurs la majorité des astronomes, que celles-ci doivent être des cavités creusées dans la photosphère. Toutes les fois que les observations ont, en effet, pu rencontrer une tache bien régulière et bien stable, cette idée, — celle de *Wilson*, — a été confirmée : du moins Faye l'assure ; aujourd'hui, nous le savons, les opinions sont là-dessus quelque peu partagées[1]. Il est certain que l'expérience stéréoscopique imaginée par *Warren de la Rue*, et que tout le monde peut aisément répéter, est à cet égard frappante ; elle consiste à mettre dans un stéréoscope deux photographies de la même tache prises à deux jours d'intervalle afin d'assurer le changement de point de vue. L'effet de relief, bien qu'obtenu d'une manière artificielle, est alors saisissant. Quoi qu'il en soit, Faye considère la question comme tranchée.

3. — Un autre problème important est l'état physique de la photosphère : Faye la croit gazeuse, et la principale raison qu'il donne de son opinion est la célèbre expérience *d'Arago*. On sait qu'Arago a établi que la lumière provenant d'un gaz incandescent n'était pas polarisée ; seule celle émise par les corps solides ou liquides peut présenter cette particularité, et *Arago* n'ayant constaté sur les bords du Soleil aucune trace de polarisation n'avait pas hésité à en conclure à l'état

[1] Voir, par exemple : Howlett, Mémoire lu à la Royal Astr. Society. *Monthly Notices*, vol. LV, p. 74, déc. 1894.

gazeux de la photosphère. *Sir John Herschel* lui avait bien objecté que le Soleil a une surface éminemment accidentée et que les polarisations variées des divers éléments pourraient s'entre-détruire. Il doit cependant y avoir une direction résultante correspondant à la surface du contour apparent de l'astre et, par suite, une polarisation globale sur les bords. Faye a d'ailleurs répété l'expérience d'Arago avec une sphère d'argent mat dont les aspérités n'ont pas empêché la polarisation de se manifester largement vers les bords et même en des régions bien plus rapprochées du centre.

Une seconde objection a été faite, qui paraissait beaucoup plus grave, mais qui n'est pas, nous le savons aujourd'hui, insurmontable. Les beaux travaux de *Kirchhoff* et *Bunsen* ont établi que, pour expliquer les raies noires du spectre de Fraunhofer, il était nécessaire de supposer, derrière la couche renversante de vapeurs métalliques lourdes, l'existence d'une source de lumière continue : ce serait la photosphère. Mais alors la photosphère émettrait un spectre continu, et l'on n'ignore pas que seuls les liquides et les solides incandescents peuvent donner lieu à un tel spectre, les gaz donnant un spectre discontinu formé de raies brillantes isolées.

Il y a donc opposition entre l'analyse polariscopique et l'analyse spectrale : c'est la raison pour laquelle *Kirchhoff* a été ramené à reprendre [1] l'idée première de *Galilée* sur la nature des taches et à considérer celles-ci comme des nuages accidentellement formés dans l'atmosphère invisible du Soleil. Cette hypothèse

[1] Avec *Spörer*, d'ailleurs.

est certainement fausse, ainsi que Galilée l'a reconnu lui-même. S'il en était ainsi, en effet, deux taches voisines centrales et séparées par un intervalle lumineux un peu étroit se confondraient quand la rotation solaire les amènerait vers les bords ; une des saillies se projetterait, en effet, sur l'autre et le filet de lumière disparaîtrait. Or l'observation montre que cet intervalle subsiste jusqu'au bord du disque et ne diminue en général que dans la proportion exigée par la perspective. Il y a deux siècles et demi que les astronomes étudient et mesurent des taches solaires sans trouver en défaut la remarque de Galilée ; celle-ci vient s'ajouter à la preuve perspective de Wilson pour confirmer l'opinion de Faye sur les taches, et par suite aussi, comme nous le verrons, sur la nature physique de la photosphère. A présent, du reste, la difficulté soulevée par les découvertes de Kirchhoff est considérée comme tranchée ; des nuages photosphériques incandescents qui seraient formés de particules solides ou liquides doivent en effet donner un spectre continu. En outre plus les gaz sont comprimés plus la largeur des raies de leur spectre augmente, et aux très fortes pressions ils peuvent aussi donner des spectres continus.

4. — On est d'ailleurs forcé de rejeter comme point de départ l'hypothèse cyclonique d'Herschel, alors en grande faveur, vu qu'elle repose sur l'idée reconnue elle-même inexacte d'un noyau solide obscur et froid ; aussi la base que Faye adoptera dans sa théorie personnelle est-elle l'idée de refroidissement progressif d'une masse considérable en rotation, masse qui par sa température excessive maintient tous les éléments dans

le chaos d'une dissociation complète, sauf à la limite[1] qui la sépare du vide et du froid des espaces célestes.

5. — Lorsque parut la théorie que nous exposons ici, les protubérances n'avaient encore pu être décelées en dehors des éclipses totales, comme elles le furent quelques années plus tard par la célèbre méthode de *Janssen* et *Lockyer;* c'est pourquoi Faye se demande tout d'abord s'il y a correspondance entre les protubérances que l'on a pu observer et les taches solaires; or on n'a jamais pu constater, quel qu'ait été le soin pris à relever les positions des taches avant les éclipses, la moindre coïncidence entre une protubérance et les taches qui avaient dû parvenir au bord à ce moment-là. Les nuages lumineux qui constituent les protubérances n'ont donc aucun rapport direct avec les taches, ainsi du reste qu'on aurait pu le prévoir aisément, puisque les taches ne se montrent que sur certaines régions du Soleil alors que l'on observe des protubérances dans toutes les parties du disque indistinctement.

6. — Il faut, par contre, faire état de la périodicité de onze années offerte par la fréquence des taches solaires, phénomène qui nous autorise à classer le Soleil dans la catégorie des étoiles variables. On a d'ailleurs noté chez les taches une tendance visible à former des groupes allongés dans le sens des parallèles qu'elles décrivent. Pour ce qui est des facules, leur liaison avec les taches est depuis longtemps

[1] La photosphère perd ainsi son caractère de surface mathématiquement définie, pour n'être plus qu'une région de transition.

remarquée; ces accidents ne diffèrent pas seulement du reste de la photosphère par l'absence des granulations et des « feuilles de saule » bien connues, mais aussi par le niveau plus élevé où elles se maintiennent au-dessus de la surface photosphérique. Leur hauteur a pu être estimée de l'ordre de plusieurs centaines de kilomètres; il est bien difficile, on le voit, d'admettre que des vagues de cette élévation puissent se former autour d'un océan liquide et y subsister des jours entiers. Un fait remarquable est encore celui-ci : les facules sont généralement plutôt à gauche qu'à droite des taches qu'elles accompagnent, ce qui revient à dire, vu le sens de la rotation solaire par rapport à nous, que les facules sont généralement en retard sur les taches.

7. — Faye considère comme un point de toute première importance la singulière loi de la rotation solaire mise en évidence par *Carrington*[1]. On sait combien cette question a intrigué les astronomes des XVII^e^ et XVIII^e^ siècles; chaque tache semble donner une valeur différente de la vitesse de rotation du globe solaire; cependant la patience de Carrington a pu, dans un ensemble énorme d'observations, reconnaître une variation continue de la période avec la latitude et relier les diverses périodes trouvées par la formule suivante :

$$\text{mouvement angulaire diurne} = 865' - 165' \sin^{\frac{7}{4}} \lambda,$$

λ étant la latitude de la tache. De plus, les déplace-

[1] Voir plus haut, page 20.

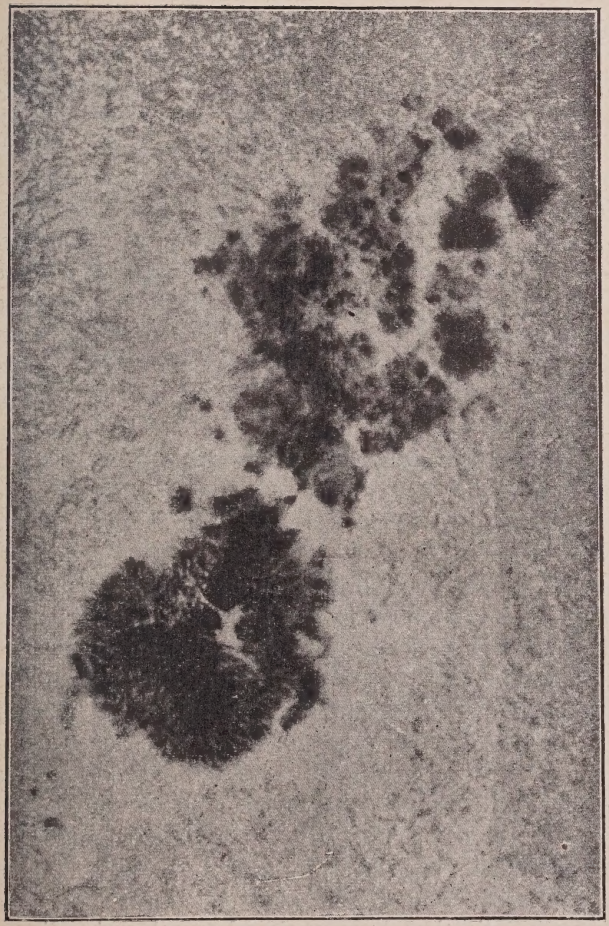


Fig. 9. — Groupes de taches photographiées à Meudon montrant la surface normale du Soleil et ses graduations.

ments des taches en latitude, c'est-à-dire dans le sens perpendiculaire au mouvement diurne, sont très faibles, presque de l'ordre même des erreurs d'observation. Faye en conclut donc qu'il n'y a pas sur le Soleil de ces grands courants relativement rapides qui sur la terre transportent des masses d'air considérables des pôles à l'équateur en rasant la surface du globe : c'est là une objection décisive contre la théorie de *J. Herschel* et qui vaut aussi contre celle de *Kirchhoff-Zöllner*. Le seul déplacement dans le sens de la longitude que manifestent en effet les taches solaires (et il est bien faible) a lieu dans le sens opposé à la théorie tourbillonnaire de ces auteurs.

8. **Synthèse générale des faits.** — Tels sont, en résumé, les principaux faits que Faye emprunte à l'observation ; reste à les interpréter. Faye observe à ce propos que le phénomène solaire, dans son intégralité, est peut-être exceptionnel pour nous qui, parmi les étoiles, n'en voyons bien qu'une seule ; mais dans l'univers entier il doit obéir à des lois très générales, valables à la fois pour notre Soleil et pour toutes les étoiles du firmament. Aussi, quand il s'agit d'attribuer une origine au Soleil lui-même, le célèbre astronome s'adresse-t-il à une théorie séduisante par sa grandiose universalité, celle proposée par *sir W. Thomson, Lockyer* et quelques autres : la réunion successive en vastes amas, sous l'empire de l'attraction, de matériaux primitivement disséminés dans l'espace.

Cette explication de la genèse du système implique, nous le verrons, la destruction d'une énorme quantité de force vive convertie immédiatement en chaleur et

fournissant, comme Helmholtz l'a montré, une provision originelle considérable d'énergie[1]. La température ainsi produite dépasse de beaucoup, sans aucun doute, celle où les actions chimiques commencent à s'exercer; le refroidissement détermine, dans la masse du gaz et de vapeurs mélangés qui constitue notre soleil, toute une série de phases successives dont la conception constitue, à proprement parler, ce que les idées de Faye ont eu d'original.

9. — En raison des pertes dues au rayonnement, pertes où la conductibilité directe ne saurait jouer qu'un rôle insignifiant, il doit s'établir bientôt, par le jeu des mouvements intérieurs, un équilibre stable entre les couches successives, analogue à celui de notre atmosphère. Les déplacements d'une couche à l'autre (dans le sens vertical) sont en effet dus à des causes qui n'existent pas dans le Soleil. Quelle que soit la température d'une pareille masse gazeuse homogène, son pouvoir émissif ne peut être que très faible; la radiation doit être toute superficielle puisque, d'après *Kirchhoff*, chaque couche jouit d'un pouvoir absorbant spécial pour les rayons émis par les couches inférieures. La conductibilité étant d'ailleurs elle-même très faible (comme c'est généralement le cas pour les corps à l'état gazeux), l'équilibre de la masse entière ne subira que de lentes modifications, et à moins de circonstances nouvelles on ne voit pas bien comment cette masse pourra émettre l'énorme quantité de chaleur que l'observation constate et qui ne paraît pas

[1] Voir chapitre III, page 142.

diminuer sensiblement au cours des siècles. Aussi Faye a-t-il là-dessus une théorie spéciale.

10. — La température de la surface solaire ne doit pas, dit-il, être beaucoup plus élevée que celles que nous savons produire dans les laboratoires, — celle de l'arc voltaïque par exemple. — Cette température superficielle est sans doute loin d'être aussi forte que celle des régions centrales où tous les corps sont vraisemblablement à l'état de dissociation. Il résulte de là qu'à la périphérie les forces moléculaires ou atomiques de cohésion et d'affinité chimique doivent commencer à apparaître; le jeu de ces forces donnera alors naissance à des précipitations; une fine poussière solide ou liquide de corps composés, — de chaux, de soude, par exemple, — se formera, tandis que s'amasseront des nuages de ces particules incandescentes dont les flammes brillantes nous offrent tant d'exemples familiers. Ces nuages, sollicités par la gravité, gagneront en tombant les couches inférieures où ils finiront par retrouver leur température de dissociation[1] et seront remplacés dans les couches superficielles par des masses gazeuses ascendantes qui viendront y subir le même sort. L'équilibre général de la masse ne sera donc troublé que dans le sens vertical par un échange incessant s'effectuant entre l'intérieur et la superficie; comme la masse interne ainsi mise à contribution est énorme, on con-

[1] On n'est plus guère disposé à admettre aujourd'hui la possibilité de véritables combinaisons à la température du Soleil; mais des changements moléculaires quelconques peuvent jouer le même rôle : nous avons cependant conservé l'expression employée par Faye (voir sur cette remarque, dans ce volume, les pages 156-160, 195, 205).

çoit que l'émission superficielle alimentée constamment par le réservoir immense de la chaleur centrale puisse présenter une régularité très grande.

Une théorie analogue à celle-là a été proposée, plus tard, il est vrai, par le professeur *Hastings*[1]. Celui-ci, considérant que le carbone et les corps de sa famille chimique (silicium, bore peut-être) sont les plus réfractaires, admet que ces éléments se précipitent les premiers dans les courants ascendants; ce seraient eux qui formeraient les grains de riz, les corps plus fusibles continuant leur ascension. On comprendrait ainsi pourquoi les raies des corps réfractaires si communs sur la terre sont absentes du Soleil; mais la température de la photosphère doit alors être la même que celle de volatilisation du carbone, ce qui reste à prouver.

La formation de la photosphère, en tant que siège des condensations, s'explique ainsi, d'après Faye, comme conséquence du refroidissement, et la même série de phénomènes doit évidemment avoir lieu dans les autres étoiles à une certaine période de leur histoire.

11. — Il n'y a plus, en outre, d'opposition entre les expériences d'*Arago* et celles de *Kirchhoff*, si l'on admet la présence dans la photosphère de particules incandescentes solides ou liquides flottant dans un milieu gazeux à la manière des nuages terrestres.

Toute la discussion reposait, en effet, sur un malentendu : un gaz incandescent, pour les spectroscopistes, ne saurait contenir aucune particule solide; la lumière

[1] *Proceedings of the American Academy of arts and sciences*, Boston, nov. 1880, et *American Science*, janv. 1881.

d'un bec de gaz qui donne un spectre continu et n'est cependant pas polarisée montre d'une façon frappante comment se peuvent concilier les deux expériences opposées ; l'incandescence est due principalement aux corpuscules de noir de fumée en suspension dans la flamme. Le spectre des bords solaires doit de plus être identique à celui du centre du disque[1], ce qui n'aurait certainement pas lieu, selon Faye, si l'absorption, au lieu d'être produite par la masse gazeuse tout entière, était exclusivement causée par une couche sphérique peu épaisse.

12. — Ainsi donc, les couches successives de la photosphère sont parcourues par des courants verticaux ascendants et descendants. Dans cette agitation incessante, on comprendra aisément que partout où les courants ascendants prennent le dessus, la matière lumineuse de la photosphère soit momentanément dissipée. Faye croyait trouver là une explication plausible des taches ; il se produit alors, disait-il, une sorte d'éclaircie à travers laquelle on aperçoit, non pas le noyau solide, froid et noir du Soleil comme le voulait Herschel, mais la masse gazeuse ambiante et interne. Le pouvoir émissif de celle-ci, malgré sa très haute température, est alors très faible par rapport à celui des nuages lumineux formés de particules liquides ou solides, et la différence de ces pouvoirs suffit à expliquer le contraste si frap-

[1] Ceci résultait des expériences de *Janssen* connues à l'époque. Depuis, les recherches de *Hale* ont révélé des dissemblances dont les plus fortes avaient déjà été signalées par M. Deslandres : certaines raies sont assombries ou élargies sur les bords, signe d'une absorption plus forte ; cependant les différences sont très faibles en général.

pant des deux teintes quand on les observe avec des verres sombres. Cette opinion de Faye sur les taches solaires était aussi partagée à l'époque par le *P. Secchi;* ils changèrent tous deux d'avis, nous le verrons dans un moment, devant les objections qu'on leur opposa. Les mesures thermo-électriques du célèbre astronome italien ne contredisent nullement, nous devons le dire, son explication[1]; elles ont paru montrer que les taches nous *envoient* moins de chaleur[2] que les régions voisines plus lumineuses; et c'est assez naturel, l'émission calorifique et l'émission lumineuse n'étant que des aspects divers d'un même phénomène.

13. **La loi de rotation du Soleil.** — Passons maintenant à la loi de rotation découverte par *Carrington.* De l'échange continuel qui s'opère entre les couches profondes et la surface au moyen de courants verticaux, il faut conclure que les lois ordinaires de la rotation d'une masse fluide en équilibre sont sans doute grandement altérées. Les masses ascendantes, parties des couches profondes, arrivent à la surface avec une vitesse linéaire de rotation plus faible, puisque les couches d'où elles partent sont plus rapprochées du centre. Il doit en résulter un ralentissement général de la photosphère, tandis que les courants descendants venant des hautes régions apportent aux couches inférieures leur plus grande vitesse linéaire.

Si donc la photosphère est en retard sur la rotation

[1] Les taches devraient alors, semble-t-il, être des régions de haute température par rapport aux régions voisines, ce qui est encore discuté.

[2] *Langley* et *Frost* ont plus récemment observé parfois l'inverse.

générale, les couches profondes devront se trouver en avance sur ce mouvement.

Que va-t-il résulter de cette opposition ? Tandis que la photosphère aura une faible tendance à se rapprocher de l'axe de rotation en coulant superficiellement vers les pôles, les couches inférieures tendront, au contraire, à se porter vers l'équateur. Les choses se passeront comme si les courants verticaux avaient leur point de départ sur une surface interne ellipsoïdale plus éloignée des pôles que de l'équateur; en d'autres termes, les couches successives superficielles seront plus épaisses aux pôles que partout ailleurs[1]. Le calcul montre que leur profondeur varierait à peu près comme le carré du sinus de la latitude, il en serait de même, par suite du retard des zones successives de la photosphère ; aussi Faye est-il amené à corriger la formule empirique de Carrington et à la remplacer par la suivante :

$$\text{Mouvement diurne} = 862' - 186' \sin^2\lambda,$$

qui représente tout aussi bien les observations et a l'avantage d'écarter l'exposant $\frac{7}{4}$ du sinus, exposant dont la signification naturelle est bien difficile à justifier. Il est bon d'ajouter, d'ailleurs, que les observations des taches ne peuvent nous guider que jusqu'à une certaine latitude (50° au maximum). Au delà, nous en sommes

[1] Malheureusement on ne voit guère de faits permettant d'affirmer qu'il en est ainsi dans la réalité. On consultera avec fruit, sur toute cette partie de la théorie de Faye et aussi d'une façon générale, l'intéressant ouvrage de l'*abbé Moreux* : Le Problème solaire. Paris (Bertaux), 1900, p. 156-176.

réduits aux conjectures que sans doute les progrès des autres méthodes, — en particulier de la méthode spectroscopique de *Doppler-Fizeau*, — pourront plus ou moins corroborer[1].

Pour ce qui est des facules, Faye les attribue, comme les taches, aux courants ascendants de la matière solaire; elles résultent de la violence de l'afflux qui cause les taches et soulève de part et d'autre les nuages lumineux.

Par cela seul que les facules s'élèvent plus haut que la surface, leur mouvement doit être un peu en retard sur la zone correspondante de la photosphère; de là leur tendance, que nous avons relevée, à se placer tout d'abord un peu en arrière des taches pour se perdre bientôt dans celles-ci au fur et à mesure que l'équilibre se rétablit.

14. **Idées cosmogoniques.** — On saisit mieux l'ensemble de la théorie solaire de Faye si on la rapproche de ses conceptions cosmogoniques. Dans le refroidissement d'une masse fluide isolée dans l'espace, en mouvement de rotation et portée à une température considérable, Faye distingue trois phases :

1° La phase de complète dissociation. La température décroît du centre à la surface. Le pouvoir émissif est très faible; la lumière est purement superficielle, puisque celle des couches profondes peut être absorbée

[1] Le travail de Duner, *Recherches sur la rotation du Soleil*, présenté en 1891 à la Société royale d'Upsal, a permis de montrer ainsi que la loi de Carrington ne cessait pas d'être satisfaite dans les régions polaires. Depuis la question a été reprise par *J. Halm* (*A. N.*, n° 4146-47) et par Duner lui-même (Upsal, Soc. royale, 1906). Mais la précision des mesures reste faible.

entièrement par la périphérie. Le spectre se compose d'un petit nombre de raies brillantes. Nous sommes dans le cas des nébuleuses gazeuses distinguées des autres dans la suite par *Huggins*[1].

2° La couche superficielle se refroidit. Certaines combinaisons chimiques deviennent possibles. Une photosphère se forme qui détermine le contour apparent de la masse et possède un pouvoir émissif intense. La lumière produite vient d'une profondeur considérable au-dessous de la photosphère. On a un spectre de raies noires. Les courants ascendants et descendants de convection qui s'établissent entre les couches profondes et la surface permettent à l'astre de rayonner avec régularité une quantité de chaleur énorme. De plus, la rotation de la surface ne s'exécute pas tout d'une pièce, comme dans la phase précédente où la masse fluide s'écarte peu des conditions de l'équilibre. Nous sommes dans le cas des étoiles du type solaire Arcturus, Capella, etc., et du Soleil lui-même.

3° Par les progrès du refroidissement, les courants verticaux se ralentissent; la masse entière se contracte peu à peu. Lorsqu'elle est parvenue à une densité moyenne suffisante, la photosphère a une consistance liquide, puis visqueuse ; enfin elle se prend en une croûte solide. Toute communication avec la masse centrale est interceptée; le refroidissement de celle-ci ne s'opère plus ainsi par convection, mais par la simple conductibilité d'un liquide plus ou moins pâteux. Tandis que la croûte solide se refroidit toujours davantage, la rotation qui s'est accélérée conformément à la loi des

[1] Voir, par exemple, Young, *General Astronomy*, 1904, p. 557.

aires se régularise ; elle en vient à s'effectuer tout d'une pièce. L'intensité de la radiation baisse en même temps rapidement. Le spectre, sans changer de nature, ne présente plus que les raies d'absorption dues à la couche atmosphérique devenue distincte du corps même de l'astre. Le spectre des bords diffère alors notablement, vu la plus grande épaisseur traversée, de celui du centre. Enfin arrive l'extinction définitive. C'est la période de formation des planètes et de leurs couches géologiques.

15. **Critiques.** — Nous venons de résumer la théorie primitive de Faye ; elle rencontra un certain nombre d'objections présentées en Angleterre par *Spencer* et en Allemagne par *Kirchhoff*. Faye y répondit lui-même[1], en n'hésitant pas à modifier sa théorie quand il le fallait. C'est surtout l'explication des taches qui prête le flanc à la discussion[2].

Plusieurs observateurs, notamment *Chacornac*[3], remarquèrent dans les taches des mouvements centripètes ; la matière photosphérique semblait se précipiter vers l'intérieur de la tache, ce qui s'opposait formellement à l'idée de courants dirigés de bas en haut.

Le pouvoir émissif d'un corps est, fit-on de plus observer, directement lié à son pouvoir absorbant, cela en vertu de la loi de Kirchhoff. Si les gaz solaires intérieurs ont un pouvoir émissif faible, — ce qui, on se

[1] *C. R.*, t. LXXV, 1872, p. 1664.

[2] Cette explication est cependant admise par Proctor dans un ouvrage assez récent.

[3] Lockyer, *Contributions to Solar Physics*, p. 70.

le rappelle, causerait par contraste l'apparence des taches, — leur pouvoir absorbant doit l'être également ; ils sont à peu près transparents et, par suite, le noyau ne saurait être obscur : on verrait au moins par l'ouverture de la photosphère, à travers la masse entière, la région opposée. C'est précisément cette difficulté que Kirchhoff croyait lever par son hypothèse des nuages solaires, tandis qu'en Angleterre les astronomes de Kew, *Spencer*, *Balfour-Stewart*, *Warren de la Rue* et *Loewy* imaginaient des courants descendants de l'épaisse atmosphère relativement froide que l'on mettait alors autour du Soleil.

16. **Théorie cyclonique des taches.** — Faye reconnaît que si les taches sont des lacunes dans la photosphère, leur intérieur doit être moins chaud que la couche où elles se forment ; il est donc impossible qu'elles proviennent d'éruptions ascendantes, puisque la température du centre, — tout le monde l'admet, — doit être beaucoup plus élevée que celle de la périphérie.

D'autre part, il ne saurait y avoir autour du Soleil qu'une couche mince agitée de mouvements violents, la chromosphère, et en tout cas aucune atmosphère à la fois épaisse et tant soit peu dense. D'ailleurs on *voit* les éruptions qui constituent les protubérances, et si les taches devaient en être la conséquence, il y aurait entre ces dernières et les protubérances une coïncidence qui, nous l'avons vu, n'existe pas.

La clef de l'énigme, Faye la voit alors dans une comparaison avec les trombes terrestres ou les tourbillons de nos cours d'eau. Ces phénomènes, auxquels

se joignent les cyclones[1], sont dus à des différences de vitesse linéaire entre les diverses couches fluides voisines. Or les zones successives de la photosphère présentent précisément, dans leur rotation, des différences de vitesse assez considérables, puisque de l'équateur au 45e degré de latitude la durée de la rotation passe de $25^j,2$ à $27^j,7$. La vitesse linéaire varie alors du simple au double. Si les différences de vitesse engendrent des tourbillons ou des cyclones[2] dans la véritable mer de nuages qu'est la photosphère, ces régions troublées présenteront alors les caractères que nous sommes à même de constater dans les taches.

17. — Disons d'abord quelques mots de ces trombes de notre atmosphère qui, par analogie, doivent nous servir à expliquer les taches. On sait qu'à de grandes hauteurs, des courants aériens souvent animés de grandes vitesses et entièrement différents en direction les uns des autres peuvent prendre naissance : c'est précisément à savoir tirer parti de ces vents variables avec l'altitude que se réduit surtout l'habileté personnelle de l'aéronaute en ballon libre. La différence des vitesses de deux courants voisins occasionne un tourbillon, et celui-ci ne tarde pas à s'enfoncer verticalement jusqu'au sol en forme d'entonnoir, tout en conti-

[1] Déjà, avant Faye, *Herbert Spencer* avait émis l'idée que les taches solaires étaient des sortes de « nuages cycloniques » (*The Reader,* 25 févr. 1865).

[2] Il semble toutefois que la cause est un peu faible, étant donné l'effet. (Voir Young, *the Sun,* p. 174.) A la latitude solaire 20°, deux points, à 1′ de distance l'un de l'autre, n'ont qu'une différence de vitesse relative de 5 mètres par minute. C'est là une objection sérieuse.

nuant à suivre le mouvement général du courant supérieur qui l'alimente.

Souvent la trombe n'atteint pas le niveau du sol; souvent aussi, — la plupart du temps, — elle reste invisible. Mais sur mer l'humidité de l'air est considérable, et le froid causé par le passage du météore produit une gaine de brouillard qui constitue le phénomène tel qu'on l'observe. La partie inférieure creuse alors avec furie la surface de la mer, en produisant alentour une puissante aspiration suivie d'un violent remous circulaire. Les trombes durent peu, en général, mais les cyclones, qui sont des trombes démesurées, durent parfois des semaines entières en se déplaçant sur tout le globe à des vitesses très grandes.

18. — Revenons aux taches solaires. Les recherches de Faye sur ce qu'il appelait la parallaxe des taches lui avaient donné à penser que leur profondeur devait être de l'ordre de $\frac{1}{200^e}$ ou de $\frac{1}{100^e}$ du rayon solaire. Il pouvait donc les considérer comme des tourbillons d'axe à peu près vertical engendrés dans la photosphère par les différences de vitesses auxquels nous avons fait allusion. Ces tourbillons doivent donc s'évaser en entonnoir vers le haut, c'est-à-dire vers la surface photosphérique, exercer à la circonférence une action centrifuge et produire à l'intérieur une sorte d'aspiration; les courants ascendants qui alimentent la photosphère reflueront donc tout autour du tourbillon, tandis qu'à son orifice supérieur les « grains de riz » lumineux de la photosphère, grains dus sans doute à la condensation de courants de vapeurs venant du des-

sous, seront écartés ou aspirés sans pouvoir se renouveler. L'orifice constamment circulaire (du moins dans le cas normal) se trouvera donc privé de l'éclat général de la photosphère, vu que celui-ci est principalement causé par les « grains de riz », séparés les uns des autres par des intervalles relativement sombres. Quant aux courants ascendants rejetés hors de l'axe du tourbillon, ils iront porter à la périphérie leurs nuages de condensation ; ceux-ci s'ajouteront aux amas brillants qui s'y forment d'ordinaire et augmenteront l'éclat de cette région. Ainsi donc les facules trouveront tout naturellement là leur explication.

19. — Jusqu'ici nous ne voyons pas trop comment la pénombre et le noyau de la tache pourront prendre leur apparence si nette. Mais les tourbillons exercent sur les couches relativement froides qui surmontent la photosphère un appel dans le sens de l'axe et dirigé de haut en bas, — de même que, dans nos rivières, un corps flottant à la surface est entraîné au fond par les tourbillons liquides. — Cette aspiration introduira dans l'axe du tourbillon un mélange de gaz et de matières refroidies dont l'absorption considérable produira l'obscurité relative du noyau des taches.

On a constaté que les grains de riz de la photosphère prenaient dans les environs d'une tache, et surtout de sa pénombre, des figures et des dispositions très différentes ; ils s'allongent et se pressent autour de la tache, tandis que dans la pénombre même ils sont plus écartés et dirigés en général vers le centre, tout en conservant leur forme déliée.

Faye rapproche de sa théorie ces apparences qui, sur

presque toutes les photographies de taches solaires, se constatent aisément. Elles tiennent à la forme en entonnoir du tourbillon central. Les courants ascendants rencontrent sur ses parois inclinées la température de condensation qu'ailleurs ils ne trouvent qu'un peu plus haut, dans la couche limite de la photosphère; les nuages lumineux se condensent donc sur cette paroi et s'y allongent tout naturellement, et il en est ainsi tout autour du tourbillon.

Nous saisissons à présent la raison pour laquelle l'analogie relevée par Faye n'avait pas été remarquée plus tôt; nous ne voyons les taches qu'en projection, pour ainsi dire comme un entonnoir dont on tournerait vers nous l'embouchure; il nous serait, dans ces conditions, bien difficile de reconnaître sa forme, tandis que les trombes marines se présentent à nous en élévation; aussi ne soulèvent-elles pas les mêmes incertitudes.

On comprend aussi le mécanisme de la disparition d'une tache et comment la couche de niveau de la photosphère envahit la tache de tous côtés en y amenant ses pailles lumineuses, puis ses grains de riz; dans ce cas la tache se referme. Des courants giratoires parasites peuvent d'ailleurs se reformer et donner naissance à des tourbillons secondaires; il y a alors segmentation d'une tache solaire.

20. — Faye s'occupe également de la chromosphère, et il se demande d'où peuvent bien venir les flammes d'hydrogène et d'hélium. Si ces gaz sortent sans cesse de l'intérieur, leur masse doit augmenter constamment, ce que les observations des protubérances ne confirment

en aucune façon. Puisque l'hydrogène n'est pas expulsé hors du Soleil, malgré sa légèreté, malgré aussi l'absence de toute indication relative à des courants descendants, il faut qu'il rentre d'une manière ou d'une autre dans les régions centrales de l'astre. Cette rentrée peut très bien s'opérer, dans l'opinion du célèbre astronome, par l'appel vers le bas que produisent les taches. Les gaz légers ainsi aspirés vers les couches basses peuvent s'y répandre pour en être expulsés, grâce à la haute température qu'ils y acquièrent, puis s'élancer alors dans l'espace en donnant naissance aux protubérances.

21. **Points non élucidés**. — Enfin nous devons dire qu'il y a un certain nombre de points que Faye considère, dans sa théorie, comme insuffisamment élaborés et qu'il laisse à peu près de côté. Ce sont :

1° L'influence de la rotation générale de l'astre sur les mouvements giratoires locaux des taches.

2° Pourquoi les taches de longue durée ne se trouvent-elles presque jamais dans les latitudes inférieures à 8°, jamais dans celles supérieures à 51° ?

3° Quelle est la cause de la périodicité des taches et de leur disparition presque complète à l'époque des minima ?

4° Enfin l'apparition des protubérances dans des régions privées de taches (par exemple vers les pôles) reste, à son avis, toujours mystérieuse.

La théorie de Faye ne cherche donc pas à répondre à ces questions que l'avenir seul pourra résoudre. Par contre, en résumé, les points les plus importants qu'elle prétend établir sont les trois suivants : 1° le Soleil est

principalement à l'état gazeux; 2° des courants de convection verticaux permettent à sa chaleur de nous arriver sans diminution sensible au cours des âges; 3° la photosphère est une surface de condensation imposée à l'astre comme à tous les corps célestes par la basse température des espaces cosmiques.

Nous avons, chemin faisant, dit un mot de l'obstacle le plus grave que rencontre la nouvelle forme de la théorie cyclonique des taches : tout y repose sur des mouvements tourbillonnaires que les faibles différences de vitesse de la loi de *Carrington* ne suffisent pas à justifier. Toutefois l'objection n'est pas sans réplique, et l'observation peut encore se prononcer là-dessus en faveur de Faye. *Adhuc sub judice lis est.*

THÉORIE D'ÉGON D'OPPOLZER

1. — Les idées de Faye avaient renouvelé la face de la question, et l'on vit bientôt paraître à sa suite plusieurs autres théories « météorologiques » des phénomènes solaires. Ces théories ont au moins un point commun; elles cherchent toutes à invoquer des courants plus ou moins analogues à ceux qui existent dans l'atmosphère terrestre. C'est ainsi que *Lockyer*[1] publia, en 1886, son explication des taches solaires. Celles-ci seraient causées par une vaste circulation de l'atmosphère solaire : des courants issus des pôles s'élanceraient au-dehors pour retomber en énormes

[1] *Proc. Roy. soc.*, n° 244, 6 mai 1886, et *The Chemistry of the Sun.*

masses condensées dans la région des taches. Nous n'entrerons pas dans le détail de cette idée; comme elle fut reprise et perfectionnée par *Egon d'Oppolzer* [1], nous nous attacherons surtout à décrire la conception générale de ce dernier.

2. **Difficultés soulevées par les courants convectifs verticaux.** — On y trouve, en particulier, un côté original : d'Oppolzer, se séparant en cela de presque tout le monde, ne considère pas les courants de convection commme possibles dans le Soleil. L'astre entier serait, pour lui, dans un état beaucoup plus voisin de l'équilibre isothermique que de l'équilibre adiabatique [2]; et pour l'affirmer l'auteur se fonde sur les différences énormes de température qu'éprouveraient les masses gazeuses en mouvement si l'on admettait qu'elles pussent notablement se déplacer dans le sens vertical.

Supposons, en effet, applicables les lois physiques connues et cherchons à calculer l'élévation de température que produirait dans un courant vertical le passage d'une altitude à une autre. Soient p la pression, T la température absolue, ρ la densité en un point, γ le rapport $\frac{C}{c}$ des chaleurs spécifiques; on sait que l'on

[1] *Astronomy and Astrophysics*, t. XII, 1893, p. 419 et 736.

[2] Il suffira de dire ici que la caractéristique distinctive du second de ces états d'équilibre est précisément l'existence de courants matériels intérieurs. Chaque élément a, de plus, la température correspondant à la pression au point où il se trouve. Pour plus de détails, on peut se reporter plus loin, page 184.

a, d'après les lois de Laplace et de Gay-Lussac :

$$p\left(\frac{1}{\rho}\right)^{\frac{c}{c}} = \text{C}^{\text{te}}, \qquad \frac{p}{\rho T} = \text{R}.$$

On en déduit, après élimination de ρ :

$$\frac{dT}{T} = \frac{\gamma - 1}{\gamma}\frac{dp}{p}.$$

D'autre part, à un accroissement de hauteur dh correspond une diminution de pression dp donnée par[1] :

$$\frac{dp}{p} = -\frac{g'}{RT}\,dh$$

(g' = constante de la pesanteur solaire).

On en déduit :

$$\frac{dT}{dh} = -\frac{g'}{R}\frac{\gamma - 1}{\gamma} = \text{constante}.$$

Or cette constante, qui représente l'élévation de température par unité de longueur dans le sens vertical, est *énorme;* d'Oppolzer trouve qu'une masse gazeuse qui s'abaisse de 1″, soit 720 kilomètres, voit sa température s'élever de 14 000° en la supposant formée d'hydrogène. A une distance de 8″ du bord, hauteur où le spectroscope constate encore la présence de vapeurs métalliques, la température serait donc de 100 000° plus basse que sur la photosphère ; et si l'on applique le calcul à l'hydrogène chromosphérique, c'est par millions de degrés que se chiffre la différence de température.

[1] Cette équation n'est autre que celle de la mesure barométrique des altitudes terrestres.

Mais les observations modernes tendent toutes à présenter la surface solaire comme relativement peu chaude par rapport aux fantaisistes évaluations d'autrefois[1]. 10000° est aujourd'hui considéré comme un maximum ; aussi d'Oppolzer conclut-il hardiment : du moment que les courants photosphériques verticaux de *Faye* et de ses partisans conduisent à des résultats absurdes, c'est qu'ils n'existent pas.

Les variations de température étant manifestement beaucoup plus faibles que ne l'indique l'hypothèse adiabatique, le Soleil est sûrement, selon d'Oppolzer, dans un état de stabilité extrême. Les taches, qui semblent bien dues à des refroidissements locaux, ne sauraient donc avoir pour cause un apport de matières venant des régions supérieures de l'atmosphère solaire.

3. **Explication météorologique des taches.** — D'autre part, les raies de Fraunhofer sont très souvent renversées dans les spectres des taches ; on voit là aujourd'hui, depuis les recherches de *Hale*[2] en 1908, un dédoublement de raies *sombres* dû à l'effet Zeeman et partant à des courants électriques circulant autour des taches. Mais il y a seulement dix ans nul ne songeait à cette explication imprévue du renversement, et d'Oppolzer, d'accord avec les idées alors reçues, en conclut à la présence d'une couche supérieure plus chaude. Étant donné l'aspect habituel des raies H et K dans les taches[3], cette couche ne saurait ressembler

[1] Voir plus loin, page 134.

[2] *Astroph. Journal,* nov. 1908, p. 315.

[3] On sait que dans le spectre solaire normal ces raies sont doublement renversées : au centre de la raie se trouve une fine raie noire. Le renversement est simple au milieu des taches.

à celles formant les facules ou les protubérances. Si maintenant nous nous en tenons aux observations de *Langley* et *Frost*[1], qui nous montrent les taches comme plus chaudes que les régions voisines, nous voyons que la question se ramène à celle-ci : d'où peut provenir l'élévation locale de la température sans laquelle il n'y aurait sans doute point de taches?

C'est alors qu'interviennent les analogies météorologiques qui constituent l'autre pivot de la théorie. La température ne peut s'élever que par l'effet de courants descendants; ces courants viennent bien nécessairement de régions plus froides du Soleil, mais au lieu d'amener, comme on pourrait le penser *a priori*, un refroidissement, ils produisent l'effet inverse, et cela en vertu des principes théoriques exposés dès le début. Les masses gazeuses ainsi transportées se réchauffent à mesure qu'elles s'enfoncent et la diminution de densité résultante tend à arrêter leur chute, tandis que la pression va croissant. Sur la terre, il se passe à certaines époques des phénomènes comparables à celui-là, auxquels on a donné le nom d'anticyclones. En hiver, sous nos latitudes, les aires de haute pression correspondent à celles des grands froids; la terre est alors couverte de nuages. Or les observations faites en montagne nous apprennent que ce froid ne s'étend pas en

[1] C'est là un point discuté encore aujourd'hui : les taches sont-elles réellement plus chaudes? ont-elles seulement un pouvoir émissif moindre? Il est difficile de le dire : on n'est même pas sûr que les observations de Langley et Frost soient exemptes d'erreurs systématiques.

Pour ces observations, voir : *Astronomy and Astrophysics*, vol. XI, p. 734; *Astroph. Journ.*, vol. IV, 1896, p. 201; *Monthly Notices*, vol. XXXVII, p. 5.

général aux hautes altitudes, et qu'au-dessus de la région froide l'air est exceptionnellement clair et transparent, alors que la température s'y élève d'une manière anormale. Au-dessus de la couche froide se trouve donc une couche chaude, et l'on peut démontrer qu'en ces régions et plus haut encore les masses d'air vont en descendant, ce qui explique à la fois leur transparence et leur haute température. Cette transparence favorise le rayonnement de la terre vers les espaces célestes[1]; elle suffit alors à rendre compte du froid constaté au niveau du sol et des nuages qui en sont la conséquence.

Oppolzer considère donc, avec *Spörer*, que les taches sont des régions de haute pression analogues aux « taches terrestres » déterminées sur la terre par la hausse du baromètre en hiver; ces derniers points, vus d'une autre planète, auraient l'apparence de taches sombres en retrait sur une éclatante mer de nuages, et si les nuages superficiels n'étaient pas trop épais, on pourrait au travers voir par transparence la surface du sol au centre de l'anticyclone. Comme les changements météorologiques généralement rapides transformeraient assez vite l'aspect des phénomènes, nous concevons aussitôt que, dans le Soleil, les taches puissent changer sans cesse de forme.

4. **Les grands courants de l'atmosphère solaire.** — Les courants descendants invoqués ici nécessitent ailleurs des courants ascendants; la répartition des taches en latitude conduit à placer ces derniers

[1] Comparer avec une idée de Zöllner, page 16.

dans les régions polaires. Le fait qu'aux époques de minimum de l'activité solaire les taches apparaissent de préférence dans les hautes latitudes (*loi de Spörer*), tandis que disparaît la ceinture équatoriale du cycle précédent, donne une certaine probabilité à l'opinion émise par d'Oppolzer. Les courants émanés des régions polaires viendraient alors s'étaler et mourir en longues spirales dans les régions équatoriales[1], et leur action semblerait bien d'accord avec la loi de Spörer.

Le Soleil posséderait, dans cette hypothèse, deux sortes de vastes cyclones, un autour de chaque pôle. Imaginons au moment du minimum des taches une recrudescence des courants polaires : les taches vont apparaître dans les hautes latitudes. Si les courants croissent encore, les basses latitudes seront bientôt envahies, les taches deviendront de plus en plus nombreuses. Le courant polaire diminuant, les taches disparaîtront d'abord des hautes latitudes ; il n'en restera plus que quelques-unes près de l'équateur, jusqu'à ce que la circulation devenant plus active, les phénomènes se reproduisent dans le même ordre.

5. **La loi de rotation.** — La rotation particulière du Soleil peut aussi s'expliquer : les courants polaires n'apportent avec eux dans les régions qu'ils traversent aucune vitesse normale, aux méridiens[2], et leur frottement insignifiant sur les couches plus basses leur permet de conserver longtemps des vitesses au

[1] Le Père Secchi parlait aussi de courants analogues, mais photosphériques, et qu'il concevait en sens inverse. L'idée de d'Oppolzer paraît plus naturelle.

[2] Puisqu'aux pôles la vitesse linéaire de rotation est nulle.

moins très faibles; mais à la fin, après qu'ils ont décrit peut-être plusieurs fois le tour du Soleil, le frottement finit par se faire sentir; ils en arrivent à être entraînés par la rotation générale de l'astre, et cela d'autant plus fortement qu'il s'agit de régions plus voisines de l'équateur.

6. **Autres arguments.** — Les régions polaires sont donc les parties calmes du Soleil. Or les protubérances quiescentes qui restent en suspens dans l'atmosphère solaire, souvent sans toucher la surface, à la manière des nuages terrestres, semblent se montrer de préférence vers les pôles et y subsister parfois pendant une révolution entière; cette observation plaide en faveur de la théorie. Il en est de même de l'aspect de la chromosphère qui, aux époques de minimum, c'est-à-dire au début d'une recrudescence des courants polaires, paraît, d'après *Trouvelot* [1], plus épaisse aux pôles, tandis que l'année d'avant elle s'étend régulièrement sur toutes les latitudes. Enfin la couronne, dans son aspect général, semble confirmer cette thèse; un coup d'œil suffit à s'en convaincre.

7. — Il y a peu d'objections à faire à la théorie d'Oppolzer et, d'une façon générale, c'est une de celles qui expliquent le mieux les faits observés, — *Young* dit même : celle qui les explique le mieux [2]. — Toute la question est de savoir si ces énigmatiques courants polaires existent en réalité, et il faut bien avouer que l'on n'en a aucune preuve directe. Oppolzer ne nous

[1] *Wash. Obs.*, 1876, App. III, p. 80.
[2] *General Astronomy*, p. 204.

explique d'ailleurs pas davantage le mécanisme qui donne naissance à ces courants et les fait varier périodiquement.

THÉORIE DE BRESTER SUR LA DISSOCIATION

1. **Réaction contre toute application de la météorologie au Soleil.** — Avec M. *Brester*, nous avons une vigoureuse contrepartie des idées précédentes, où l'assimilation avec les phénomènes atmosphériques est toujours poussée plus ou moins loin. Ce savant, dont les travaux ont paru en Hollande vers 1888[1], estime en effet que toute extension de la météorologie terrestre aux phénomènes solaires est viciée dans sa base. Les courants aériens que nous constatons sur la terre sont précisément dus, dit-il, à l'influence du Soleil lui-même; il est donc peu logique d'en imaginer de semblables dans le Soleil. Si cet astre n'existait pas, l'atmosphère terrestre serait à peu près complètement immobile : celle du Soleil doit donc être d'un calme relatif, en tout cas dépourvue de ces cyclones et tourbillons auxquels Faye, Zöllner, Secchi et d'Oppolzer faisaient si largement appel. Il y a encore à cela une autre raison : l'état généralisé de dissociation qui doit régner chez un astre incandescent, comme conséquence de sa haute température, doit aussi s'opposer à ce que celle-ci baisse notablement; tout abaissement tend en effet à produire une combinaison qui, une fois effec-

[1] *Essai d'une théorie du Soleil et des étoiles variables*, par A. Brester, Delft, 1888. Notre ouvrage étant sous presse, un nouvel article de Brester a paru dans la *Revue générale des Sciences*, 5 juin 1909.

tuée, dégagerait de la chaleur. C'est ainsi qu'une quantité donnée de vapeur d'eau ne peut se refroidir au-dessous de 100° tant que toute la masse n'est pas condensée.

2. **Les « éruptions de chaleur ».** — Tout refroidissement de l'astre est donc rendu impossible, et *a fortiori* tout refroidissement inégal. On peut distinguer deux sortes de phénomènes parmi ceux qui tendent ainsi à rétablir l'équilibre de température : 1° la condensation des vapeurs, par le dégagement de la chaleur latente de vaporisation ; 2° la combinaison d'éléments chimiques dissociés, qui libère leur chaleur de combinaison. Si ce mécanisme était strictement respecté, on ne constaterait aucun des phénomènes caractéristiques du Soleil. Mais il peut y avoir autre chose. *H. Sainte-Claire-Deville* a observé[1] qu'en refroidissant un mélange de vapeur d'eau dissociée et d'acide carbonique on recueille encore un gaz tonnant, c'est-à-dire évidemment un mélange d'hydrogène et d'oxygène. Or s'il n'y avait pas eu d'acide carbonique, ces derniers gaz auraient dû se recombiner. De cette expérience Brester conclut que la présence de molécules étrangères en nombre suffisant peut empêcher une recombinaison qui s'effectuerait sans elles. Dans le Soleil, il est donc possible que les molécules des corps non dissociés, — jouant le rôle de l'acide carbonique dans l'expérience précédente, — en passant de l'état gazeux à l'état liquide, sous forme de brouillard,

[1] E.-H. Sainte-Claire-Deville, *Leçons sur la dissociation à la Société chimique,* Paris, 1864. *Dict. de chim.* de Wurtz, p. 1174.

deviennent trop clairsemées[1] pour empêcher les combinaisons auxquelles elles faisaient auparavant obstacle. Celles-ci se produisent alors brusquement, donnant naissance à ce que Brester appelle des « éruptions de chaleur ». Mais, fait important, la température ne s'élève pas pour cela, car la combinaison produite se détruirait aussitôt. L'éruption de chaleur a pour effet de dissocier les molécules des corps interposés ; dès qu'elle prend fin ces molécules se recombinent et reprennent leur état initial, état où elles empêchaient la combinaison. La suite des phénomènes recommence alors. On comprend donc de plus comment le refroidissement peut-être arrêté ou, du moins, considérablement ralenti, et comment dans les couches extérieures des éruptions de chaleur peuvent se produire à intervalles sensiblement égaux. Ces éruptions ne sont d'ailleurs pas l'unique cause de l'entretien de la chaleur solaire, et Brester ne conteste pas l'exactitude de la théorie de *Helmholtz*[2] sur la contraction et la récupération calorifique qui en découle ; les deux mécanismes se complètent, dans sa pensée, l'un l'autre.

3. — L'atmosphère solaire présente un caractère remarquable, où notre auteur voit un sérieux argument en faveur du calme relatif qui y régnerait. Le spectroscope nous montre que les diverses masses gazeuses sont rangées par ordre de densité : les vapeurs métalliques lourdes de la couche renversante sont aussi les

[1] Il s'agit ici des molécules gazeuses libres, au point de vue de la théorie cinétique des gaz, les seules qui puissent intervenir.

[2] Voir plus loin, page 142.

plus basses, tandis qu'on rencontre l'hélium et surtout l'hydrogène à de grandes hauteurs [1] au-dessus de la photosphère. Or l'on conçoit que cette répartition des différents corps soit beaucoup plus compatible avec l'état de repos qu'avec une agitation tant soit peu active, bien qu'elle ne l'exclue pas entièrement ; nous savons cependant que, dans notre atmosphère, des mouvements des milliers de fois plus faibles suffisent à empêcher la moindre trace de stratification en couches horizontales.

4. **Taches et facules.** — La photosphère elle-même est pour M. Brester, comme pour presque tous les astronomes modernes, une mer de nuages ; c'est dans cette couche nuageuse, aux endroits où le refroidissement dû à un rayonnement [2] local excessif condense les éléments passifs [3], que se formeraient les taches ; les corps dissociés n'étant, en quelque sorte, plus séparés par ces molécules neutres, se recombinent, et la chaleur dégagée, vaporisant sur place les masses inertes condensées dès le début, produit une sorte de trou qui nous apparaît sous forme de tache obscure : d'abord parce que la matière qui causait le spectre continu a en grande partie disparu, ensuite parce que l'absorption a été renforcée, ce qui explique la grande intensité de la plupart des raies noires dans les taches. La température d'une tache doit être égale à celle de

[1] L'hélium n'est que deux fois plus dense que l'hydrogène.

[2] On voit que la cause initiale d'une tache, un excès local de la radiation, est la même pour Brester que pour d'Oppolzer (et aussi pour Zöllner).

[3] Nous appelons ainsi ceux qui jouent le rôle de l'acide carbonique dans l'expérience de Sainte-Claire-Deville.

la photosphère sous-jacente[1]; il est vrai cependant que plusieurs observateurs, dont *Secchi*, *Spörer*, *Langley*, ont observé en général[2] que les taches émettaient moins de chaleur que le reste de la surface. Brester explique le fait par un plus faible pouvoir émissif; c'est ainsi qu'un brûleur Bunsen à flamme éclairante émet plus de chaleur que le même brûleur où l'on laisse entrer de l'air; la flamme la moins lumineuse est pourtant, on le sait, la plus chaude.

5. — La matière photosphérique, en se vaporisant pour produire une tache, sans changer cependant de température, doit par contre augmenter de volume; c'est ce qui rendrait compte de la forme conique des taches, les couches hautes de la photosphère étant, par cela même, les plus mobiles. Les facules ne seraient alors que des nuages photosphériques refoulés tout autour de la tache par l'excès de pression régnant au centre.

Les successions de combinaisons et de dissociations qui constituent les éruptions de chaleur permettent, comme nous l'avons expliqué tout à l'heure, de se rendre compte de l'existence d'une périodicité dans ces éruptions; cette périodicité dépend de la nature des molécules en jeu, bien entendu d'espèces très diverses, de sorte que le rôle passif des corps interposés peut-être joué par des éléments actifs eux-mêmes par rapport à d'autres; on conçoit dès lors comment la période des taches solaires peut dépendre de la latitude.

[1] En vertu des principes posés au début.

[2] Voir plus haut les observations de Langley et Frost, page 58.

il suffit d'admettre que les diverses couches n'ont pas exactement à toutes les latitudes la même composition[1]. Cette variabilité de la période avec la latitude constitue précisément une forme de la loi de Spörer[2].

6. **Les protubérances.** — Les protubérances s'expliquent, dans la présente théorie, d'une manière analogue aux taches; ce sont de simples condensations que le refroidissement extérieur rend possible et qui, comme les éruptions de chaleur, sont à la fois passagères et locales. Mais cette explication ne convient qu'aux protubérances à spectre continu (« protubérances blanches »), visibles uniquement durant les éclipses. En ce qui touche les protubérances hydrogénées ou métalliques, — les seules couramment visibles par la méthode de *Janssen-Lockyer*, — Brester fait appel à une luminescence chimique. Les travaux modernes, ceux de *Pringsheim* entre autres, ont montré que les spectres des gaz n'étaient pas dus à l'élévation de température, mais bien à une tout autre cause. Aussi Brester en profite-t-il pour voir là des effets de la recombinaison des matières dissociées, matières que la réaction chimique rendrait lumineuses.

[1] Cette hypothèse se justifie, d'après Brester, par son explication de la rotation solaire, dont nous parlerons plus loin.

[2] Un astronome français qui a beaucoup observé le Soleil, *l'abbé Moreux*, a apporté en 1900 à la théorie dissociatrice des taches un perfectionnement en admettant que ce sont des régions de hautes pressions *surchauffées* par la condensation des couches supérieures. Dans son livre déjà cité, l'abbé Moreux applique sa théorie « hyperthermique » aux diverses particularités des taches : le suivre dans les détails nous entraînerait cependant un peu loin; nous nous contenterons de renvoyer le lecteur à l'ouvrage original.

Nous devons dire d'ailleurs que maintenant on est plutôt porté à attribuer ces luminescences à des causes électriques.

7. — Il y a plus : Brester refuse d'admettre comme réelles les prodigieuses vitesses constatées par les observateurs des protubérances, et qui peuvent atteindre 800 kilomètres par seconde. Ce ne sont, pour lui, que des indices de la propagation successive d'une réaction qui s'effectue au sein de la tranquille atmosphère solaire. Mais il y a, dira-t-on, les vitesses radiales, celles révélées par la méthode de *Döppler-Fizeau*. Brester, sans contester le principe lui-même, fait remarquer que si un déplacement relatif de la source et de l'observateur donne lieu à une variation apparente dans la longueur d'onde, il ne s'ensuit pas nécessairement que toute altération de celle-ci soit causée par un mouvement dans le sens du rayon visuel. Le mécanisme même des phénomènes de radiation est d'ailleurs trop obscur pour que l'on puisse rien affirmer catégoriquement. La pression du gaz lumineux fait aussi varier la longueur d'onde, et sans doute d'autres phénomènes encore. Sur ce point, notons-le, Brester est d'accord avec d'autres astronomes. M. *Julius*[1], notamment, attribue les déplacements de raies à la dispersion anomale, et la question est loin d'être élucidée. Cependant nous dirons que la majorité des astronomes

[1] Voir plus loin, page 100, où nous reparlons de cette question. Les vitesses de 800 kilomètres sont en particulier bien inquiétantes : au-dessus de 612 kilomètres de vitesse (voir page 138), les corps pesants ne retombent plus sur le soleil, sans parler de la résistance opposée par le milieu.

observateurs, — si l'on peut parler ici de majorité, — admet la réalité des vitesses radiales trouvées. Il est à remarquer que des réactions chimiques ne sauraient guère se propager avec la vitesse des protubérances, il faudrait faire intervenir des phénomènes de nature électrique; de plus, certains déplacements hélicoïdaux contrôlés par des mesures à la fois micrométriques et spectroscopiques de la vitesse plaident en faveur de mouvements réels.

Ajoutons que la tranquillité apparente des protubérances quiescentes et le calme de la photosphère près des endroits où éclatent de violentes éruptions semblent à M. Brester autant d'arguments en sens opposé.

8. **L'atmosphère du Soleil.** — Quant à la couronne, elle se rattache pareillement à la théorie actuelle : aux endroits où l'atmosphère gazeuse subit une perte de chaleur continuelle, la matière a tendance à se condenser; au-dessus des taches précisément, en vertu du faible pouvoir émissif de celles-ci, des traînées nuageuses doivent alors se former. Ceci expliquerait assez bien la forme d'étoile à quatre branches que présente la couronne lors des maxima des taches[1]; si les quatre principaux rayons semblent souvent venir de latitudes plus élevées que la région des taches, il n'y a là qu'un effet de projection. L'interprétation précédente des rayons coronaux cadre assez bien, du reste, avec celle présentée par *Schaeberle*[2], qui admet l'existence de jets véritables de matière lumineuse expulsée par les taches; celles-ci formeraient

[1] Voir figures 41 et 43.
[2] Voir plus loin, page 310.

ainsi, dans la photosphère, des trouées livrant passage aux vapeurs intérieures. M. Brester considère d'ailleurs que la véritable forme de la couronne est celle qu'elle offre au minimum des taches.

9. — Quant à la loi de rotation découverte par Carrington, Brester l'explique en admettant qu'une atmosphère aplatie par le mouvement, tournant comme un corps solide[1], entoure la photosphère sphérique. Il suffirait alors de supposer que les condensations proviennent des couches supérieures chromosphériques et conservent en tombant leurs vitesses ; la rotation apparente serait d'autant plus rapide que l'on s'approche de l'équateur. Comme, d'autre part, le frottement possible entre la photosphère sphérique et son enveloppe reste étroitement limité aux couches en contact, il ne change pas notablement le calme relatif qui règne dans le Soleil. Brester estime en outre que l'enveloppe gazeuse du Soleil, — formée par la couronne et la chromosphère supérieure, — est beaucoup plus dense qu'on ne le croit généralement, au moins dans ses parties basses, et cela par le seul effet de la pression des couches hautes.

[1] Ce dernier point semble maintenant près d'être établi : les recherches de Crew (*Amer. Journ. of Sc.*, sept. 1889; voir aussi Wilsing, *Astr. Nachr.*, n° 3153, et Belopolsky, *Astr. Nachr.*, n° 3158), et surtout celles plus récentes de Hale et Adams, *Astroph. Journ.*, t. XXVII, 1908, pp. 213, 219, ont montré que les raies chromosphériques, en particulier celles attribuées à l'hydrogène et au calcium, révèlent une durée de rotation unique du pôle à l'équateur. Par contre, les raies de la couche renversante, toute voisine de la photosphère, indiquent des périodes variables avec la latitude, comme les taches. (Voir Duner, *Ueber die Rotation der Sonne, Nova Acta Reg. Soc. Scient. Upsal.*, série IV, vol. I, n° 6, 1906; Pérot, *C. R.*, t. CXLVII, 1908, p. 340).

On a sans doute reconnu cette hypothèse de l'atmosphère aplatie ; sir John Herschel l'avait déjà conçue dans un but différent, et nous avons donné les raisons qui la firent écarter. La faible rotation du Soleil, vingt-cinq fois plus lente que celle de la Terre, ne la justifie en aucune façon, et si l'on veut rendre compte de la forme de la couronne aux époques de minimum, il faut chercher autre chose.

Nous dirons plus loin quelques mots de la principale objection, — tirée de la haute température du Soleil, — que rencontrent en général les théories de Brester ; nous reviendrons en effet, à propos de l'entretien de l'énergie calorifique solaire, sur la dissociation. (Chap. III.)

CHAPITRE II

THÉORIES OPTIQUES DE SCHMIDT ET DE JULIUS

1. **Historique.** — Nous en arrivons à une conception extrêmement ingénieuse, maintenant encore ardemment discutée, qui, si on l'admettait, révolutionnerait de fond en comble la plupart de nos idées non seulement sur le Soleil, mais aussi sur presque tous les corps célestes. Nous voulons parler de la théorie de *Schmidt,* plus récemment complétée et corrigée par *M. W. H. Julius,* professeur à l'université d'Amsterdam. Nous résumerons d'abord en quelques lignes les recherches qui rendirent possible cette nouvelle manière d'envisager les choses.

2. — Si nous regardons un bec Auer à travers un globe de verre transparent taillé à facettes, il sera impossible, l'expérience de tous les jours nous le prouve, ces sortes de globes étant fort répandus, de reconnaître au travers la forme du manchon incandescent. L'aspect de la source lumineuse dépendra du globe, de son indice de réfraction, de la taille ou du nombre de ses facettes et variera même s'il se déplace par rapport au manchon

lui-même. On sera hors d'état de se représenter la réalité et l'on observera par contre des jeux de lumière sans valeur objective. Cette remarque familière a été l'origine des idées dont nous allons parler. Celles-ci prirent naissance en 1860, dans un travail théorique de *Kummer*[1] où étaient étudiées avec leurs dernières conséquences les lois de la réfraction à travers les atmosphères des astres; malheureusement le mémoire passa inaperçu, et ce ne fut que bien plus tard que son importance fut reconnue.

En 1887-88, *von Seeliger*[2] montra qu'une sphère lumineuse entourée d'une atmosphère réfringente concentrique devait avoir un diamètre apparent plus grand en lumière violette qu'en lumière rouge. Des recherches furent entreprises sur le Soleil afin d'obtenir du fait une confirmation expérimentale et *Wellmann*[3], à l'héliomètre de Munich, trouva qu'en interposant un écran rouge le Soleil avait un diamètre supérieur de 4″ à son diamètre en lumière bleue; c'était précisément le contraire de ce que l'on devait trouver. Aussi Wellmann invoqua-t-il la dispersion anomale et l'expérience de Kundt; il est plus probable que ses chiffres étaient entachés d'erreurs systématiques.

Une série de mesures analogues fut exécutée par *Auwers*[4] avec l'héliomètre du Cap, pendant un mois, également à l'aide d'écrans colorés. Les résultats

[1] *Ueber atmosphärische Strahlenbrechung.* Monatsber. der Berl. Akad., 1860, p. 405.

[2] *Notiz über die Strahlenbrechung in der Atmosphäre.* Sitzungsber. der Münch. Akad., 1891, p. 239, et aussi *Ueber die Extinktion des Lichtes in der Atmosphäre.* Même publication.

[3] *Astr. Nach.*, t. CXIX, n° 2848, p. 241.

[4] *Astr. Nach.*, t. CXXIII, n° 2935, p. 97.

d'Auwers lui donnèrent, par comparaison avec la moyenne, des différences atteignant :

en lumière rouge $+0''{,}02$; en lumière bleue $-0''{,}09$,
» jaune $+0''{,}07$; » violette $+0''{,}01$.

Ces observations, très précises, font voir le peu de réalité des écarts constatés par Wellmann et montrent d'ailleurs que les effets étudiés sont fort petits. Du reste, la moindre imperfection de l'achromatisme de l'objectif a, dans de telles mesures, une importance considérable ; pour bien faire, il faudrait se servir de miroirs de grande distance focale et n'employer que des oculaires parfaitement achromatisés. Il faudrait même tenir compte dans la construction de l'oculaire des défauts correspondants de l'œil de l'observateur.

C'est à cette époque que le docteur *August Schmidt*[1], de Stuttgart, publia son opuscule où, par des moyens différents, il confirmait et généralisait les conclusions de von Seeliger.

1. **Théorie de Schmidt.** — Considérons une masse gazeuse sphérique distribuée en couches concentriques de densités graduellement décroissantes du centre au bord. On sait que l'on a, d'après la théorie ordinaire de la réfraction astronomique, l'équation caractéristique des rayons lumineux :

$$rn \sin i = \text{constante},$$

r étant la distance au centre d'un point quelconque du rayon considéré, n l'indice de réfraction absolu en ce

[1] *Die Strahlenbrechung auf der Sonne, ein geometrisches Beitrag zur Sonnenphysik.* J.-B. Metzler, Stuttgart, 1891.

point, i l'angle de la trajectoire et de la normale à la couche.

Pour deux couches infiniment voisines (fig. 10)

$$r_1 n_1 \sin i_1 = rn \sin i,$$

d'où deux cas à considérer.

1er cas :

rn croît avec r,

ou : $rn > r_1 n_1$,

ou encore :

$$\frac{d(rn)}{dr} > 0.$$

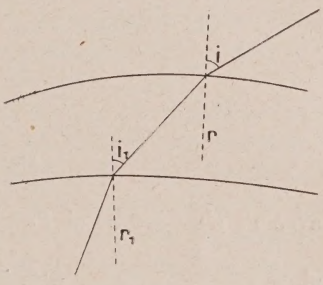


Fig. 10.

Dans ce cas, comme $\frac{dn}{dr}$ est négatif,

$$r < -\frac{n}{\frac{dn}{dr}}.$$

Mais $-\frac{ndr}{dn}$ $\left(\text{ou } -\frac{n}{n'}\right)$ est, comme il est facile de le démontrer, le rayon de courbure ρ des rayons qui se propagent horizontalement, c'est-à-dire qui sont tangents à la couche au point considéré. On a donc $\rho > r$. Comme d'ailleurs $i < i_1$, on voit de suite que la marche des rayons horizontaux doit être la suivante (fig. 11).

Les corps célestes où il en est ainsi, c'est-à-dire où la condition $\frac{d(rn)}{dr} > 0$ est constamment remplie, sont appelés par Schmidt *corps de la première sorte*. La Terre

et l'atmosphère terrestre rentrent dans cette catégorie.

2e *cas :* Si à un certain moment rn cesse de croître

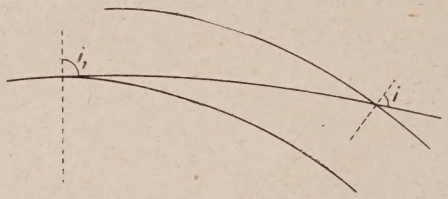


Fig. 11.

avec r, c'est-à-dire si l'on vient à avoir $\frac{d(rn)}{dr} < 0$,

alors : $$r > \frac{-n}{\frac{dn}{dr}},$$

ou encore $r > \rho$. Comme i est, dans ce cas, supérieur à i_1, la marche des rayons est celle de la figure 12. Les corps où, entre deux couches r_2 et r_3, $\frac{d(rn)}{dr} < 0$ sont dits *de la deuxième sorte*. C'est dans cette classe que la théorie de Schmidt range le Soleil.

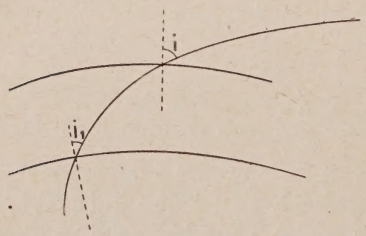


Fig. 12.

2. — Pour ces astres le rayon de courbure des rayons horizontaux peut être inférieur à celui du corps lui-même, c'est-à-dire que non seulement il peut y avoir des rayons qui ne sortent jamais et suivent des

trajectoires circulaires, mais encore tous ceux dont l'inclinaison sur l'horizontale ne dépasse pas une certaine limite sont arrêtés par le corps lui-même. Ainsi, sur un astre de la taille de Jupiter ayant une atmosphère de réfrangibilité analogue à la nôtre, les seuls rayons qui pourraient nous parvenir devraient avoir à leur sortie une inclinaison de plus de 3°22′.

Un corps lumineux formé d'un noyau solide entouré d'une atmosphère de densité décroissant avec la hauteur nous apparaîtra, s'il est de la première sorte, comme un disque lumineux estompé aux bords par suite de l'absorption : c'est ce qui a lieu en fait pour les planètes.

Tout autre sera l'aspect d'un corps de la deuxième sorte, du Soleil pour Schmidt. Comme à la périphérie on a $\frac{d(rn)}{dr} > 0$ (à l'infini, $n = 1 = C^{te}$), considérons la sphère r_3, dite sphère critique, où $\frac{d(rn)}{dr} = 0$. Entre r_3 et r_2 $\frac{d(rn)}{dr} < 0$, ensuite il peut redevenir positif. Que va-t-il alors se passer ?

3. — Pour plus de simplicité, suivons la marche des rayons lumineux en sens inverse de leur propagation, c'est-à-dire de l'observateur au Soleil (fig. 13).

Si l'observateur regarde dans la direction OA tangente à une couche du Soleil extérieure à r_3, le rayon de courbure en A du rayon lumineux est supérieur à celui de la couche, et la lumière qui, dans cette direction, parvient à notre œil provient des régions de l'espace situées derrière le Soleil ; elle est donc très peu intense.

Pour le rayon OB tangent à la sphère critique r_3, le rayon de courbure est précisément égal à r_3. Autrement dit, dans la direction OB, les rayons lumineux tournent indéfiniment autour du Soleil sans en sortir jamais ni pénétrer à son intérieur. Mais il n'en sera plus de même pour les rayons tels que OC, légèrement plus rapprochés du centre que OB. Nous

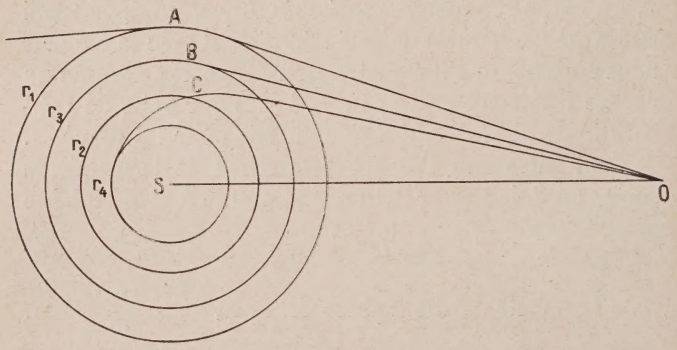


Fig. 13.

nous trouverons alors dans le deuxième cas de réfraction étudié ci-dessus, et le rayon OC pénétrera dans la couche r_3; après une trajectoire spirale plus ou moins longue, il finira par sortir de la région située entre r_3 et r_2 où $\frac{d(rn)}{dr} < 0$, après quoi il finira par rencontrer tangentiellement une couche relativement profonde r_4. Tous les rayons intérieurs à OB suivront une marche analogue, les diamètres $2r_4$ des couches qui leur correspondent pouvant prendre toutes les valeurs de 0 à $2r_3$; l'observateur recevra même des rayons provenant du centre plus ou moins normalement.

Il résulte de tout ceci que la couche r_3 forme la limite entre deux espèces de rayons : ceux qui proviennent des régions extérieures du Soleil et ceux qui nous viennent des couches profondes de l'astre. La transition est soudaine; ces derniers devant avoir tous à peu de chose près la même intensité en raison de la grande densité et partant du pouvoir émissif considérable des régions intérieures. La sphère critique nous donnera donc bien l'impression d'un globe incandescent d'éclat uniforme, et son diamètre apparent ne sera autre que celui de la photosphère, bien qu'à la place réellement occupée dans le Soleil par la couche correspondante il n'y ait rien de matériel, mais seulement une masse gazeuse tout aussi transparente en dessus qu'en dessous.

Schmidt, dans l'application de sa théorie, trouva qu'une atmosphère d'hydrogène à une température de 10000° C et d'une densité égale à 1/9 de celle de l'air normal posséderait une sphère critique. Les grains de riz, les taches, les facules n'étaient pour lui que des effets de réfractions irrégulières dans l'intérieur du Soleil, et un de ses partisans, M. Knopf[1], alla jusqu'à attribuer la couche renversante elle-même à des phénomènes de ce genre.

4. — Il semble incontestable que l'idée fondamentale de Schmidt exposée ci-dessus est mathématiquement exacte, et l'on ne saurait négliger d'en tenir compte. Cependant il en va tout autrement de la ques-

[1] O. Knopf, *Die Schmidtsche Sonnenthenie*. Jena, B. Vopelius.

tion de savoir si, en fait, dans le Soleil que nous voyons, les choses se passent bien comme le veut Schmidt, — notamment s'il existe, en général, une surface critique dans les régions extérieures gazeuses de la masse solaire. Les observations des taches et des facules nous révèlent directement que la couche où elles prennent naissance, et à la rotation de laquelle elles participent, ne doit se trouver que fort peu au-dessous de celle définissant le diamètre apparent et que nous avons appelée r_3.

Si, en effet, les taches et les facules provenaient de couches très profondes telles que r_4, elles devraient rester visibles pendant une durée bien supérieure à celle d'une demi-rotation solaire; en d'autres termes, la période déterminée par l'étude d'une tache à sa première apparition serait beaucoup plus longue que celle obtenue en notant les retours successifs à un même méridien solaire d'une tache persistante. Déjà d'ailleurs, en 1876, *Spörer*[1] avait déduit de ses observations que le rayon correspondant à la couche des taches ne pouvait être inférieur de plus de 2″ à celui de la photosphère. Ce que nous disons des taches s'applique d'ailleurs aux facules, car autrement celles-ci devraient avoir, par rapport aux taches, de forts déplacements qu'elles n'ont pas. Il en est de même de la couche absorbante correspondant aux raies de Fraunhofer : les vitesses de rotation de cette couche, fournies par la méthode *Döppler-Fizeau,* coïncident en effet avec celles données par l'observation directe des taches. Les partisans enthousiastes de la théorie de

[1] *Beobachtungen der Sonnenflecken*, II, Leipzig, W. Engelmann.

Schmidt n'hésitaient pas à attribuer à un pur hasard cette coïncidence gênante.

5. — *Seeliger*[1] a d'ailleurs fait remarquer, d'une façon générale, que l'hypothèse de Schmidt considérait le Soleil comme un globe idéalement transparent où les effets d'absorption prépondérants dans le Soleil n'existeraient pas. En tout cas, il résulte de cette discussion que les régions situées immédiatement au-dessous de la couche critique r_3 (photosphère) ne sont sûrement pas occupées, comme l'admettait Schmidt, par une atmosphère aussi transparente qu'au-dessus de cette couche. Ces régions, au contraire, sont certainement le siège de phénomènes physiques réels dont les taches et les facules sont les signes visibles.

6. — Dans un travail postérieur[2] à celui que nous avons cité, Schmidt a cherché à expliquer les protubérances par des réfractions irrégulières dues à des variations de densité et d'horizontalité des couches. Mais si les protubérances avaient cette origine, leur spectre serait continu, et pour expliquer qu'elles émettent, au contraire, des raies brillantes isolées, Schmidt a dû admettre l'existence de la chromosphère en tant que couche gazeuse à spectre de lignes voisine de la couche r_3 : c'est la lumière de cette chromosphère qui, par ses déviations irrégulières, donnerait naissance aux protubérances observées.

[1] *Astr. Nach.*, t. CXXXIII, n° 3187, p. 311, année 1893.

[2] *Erklärung der Sonnenprotuberanzen als Wirkungen der Refraktion in einer hochverdünnten Atmosphäre der Sonne*, *Sirius*, t. XXIII, 1895, p. 97. Voir aussi même recueil, p. 217.

Mais il est alors étrange que Schmidt, après avoir supposé le Soleil homogène à une distance relativement grande au-dessus et au-dessous de la couche r_3, admette pour la chromosphère l'existence de couches stratifiées, de composition définie et variable d'une altitude à l'autre.

1. **La dispersion anomale.** — Cette difficulté fut écartée, en 1900, par M. *Julius*, qui introduisit dans la théorie du Soleil un nouveau principe d'explication : la dispersion anomale de la lumière à travers les vapeurs métalliques.

Rappelons brièvement en quoi consiste ce phénomène. On sait qu'en général l'indice de réfraction d'un milieu est une fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente, fonction d'autant plus grande que la longueur d'onde est plus faible. C'est ainsi que, dans le verre, dans l'eau, les rayons rouges sont moins déviés que les rayons violets. Or il n'en est plus de même dans les vapeurs métalliques pour les radiations voisines d'une raie d'absorption. Le fait peut se mettre facilement en évidence en employant le dispositif des prismes croisés de *Kundt*. A l'aide d'un spectroscope ordinaire on produit un spectre continu horizontal ; on fait ensuite traverser aux rayons des diverses longueurs d'onde un prisme de la vapeur à étudier, à arête réfringente horizontale. Chaque rayon subit alors une déviation verticale correspondant à son indice de réfraction dans la substance considérée.

2. — C'est ainsi, par exemple, que, avec un prisme de vapeur de sodium, M. *Becquerel* a pu obtenir la figure ci-contre représentant les indices de réfraction

de cette vapeur en fonction de la longueur d'onde. On voit qu'un peu avant D_1 l'indice décroît brusquement, — à partir de la valeur très voisine de 1 qu'il avait normalement; — un peu après D_1, l'indice est très grand. Si la raie D_2 ne se trouvait pas tout près de D_1, l'indice décroîtrait régulièrement pour reprendre une valeur proche de l'unité; le voisinage de D_2 lui fait suivre la marche de la figure 14[1]. En ce qui concerne

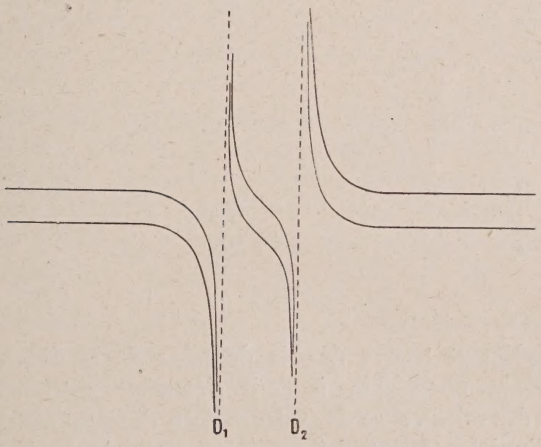


Fig. 14.

le côté quantitatif du phénomène, à 1,5 Å des raies D vers le rouge, $n = 1{,}0010$, et vers le violet $n = 0{,}9988$. Pour la vapeur de potassium la figure serait celle ci-dessous : la présence du sodium comme impureté

[1] La figure est renversée, l'arête du prisme étant tournée vers le bas.

donne lieu à une anomalie visible vers les raies D^1 (fig. 15).

La présence d'une raie d'absorption nettement dilimitée paraît être une condition nécessaire pour que le phénomène se produise; il n'est pas indispensable que la raie soit large ni que la vapeur soit très dense, et c'est là un point de grande importance.

M. *Julius* répéta les expériences de M. Becquerel, les

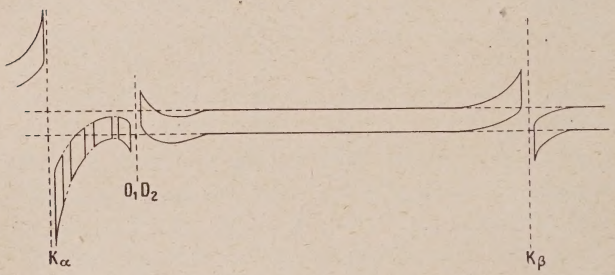


Fig. 15.

compléta et trouva que le domaine de la dispersion anomale observable à l'œil s'étendait extrêmement près des raies[2], avec des valeurs de n différant fortement de l'unité; il put même reconnaître de la lumière à $\frac{1}{60^e}$ de la distance des raies D_1D_2. C'est alors qu'il songea à l'influence possible du phénomène dans la théorie du Soleil et des étoiles fixes.

[1] H. Becquerel, *C. R.*, t. CXXVII, 1898, p. 899 et t. CXXVIII, 1899, p. 145.

[2] *Astr. Nach.*, t. CLIII, n° 3672, 1901, p. 433, et *Physik. Zeitschr.*, t. II, 1901, p. 348, 357.

3. — Faisons remarquer en passant un point intéressant. La dispersion anomale est, d'après les théories de la dispersion[1], toujours étroitement liée à l'absorption, si étroitement même qu'elle avait pu être prévue avant d'être découverte expérimentalement par *Le Roux*. Mais c'est seulement dans le voisinage des régions de forte absorption que le phénomène apparaît d'une manière sensible; il ne se montre pas auprès de toutes les raies, notamment près des bandes d'absorption diffuses, comme dans le spectre de bandes du sodium ou du potassium (voir figure 15). Cette différence montre bien que les raies spectrales doivent leur existence à deux phénomènes moléculaires au moins, distincts l'un de l'autre, et même dans certains cas la dispersion anomale pourrait servir de critérium entre les deux sortes de lignes. Mais près des raies sujettes à la dispersion anomale, celle-ci a toujours lieu dès que la réfraction a pu se produire.

4. **Théorie de Julius sur la Chromosphère.** — Une des applications les plus heureuses de la théorie de Julius est celle qu'il en a faite à la lumière chromosphérique. Que l'on admette ou non les principes de Schmidt, il faut bien supposer qu'immédiatement au-dessus de la surface solaire (de la couche critique de Schmidt) se trouve une atmosphère de vapeurs métalliques dont la densité décroît rapidement. Les indices de réfraction dans cette couche doivent différer beaucoup de l'unité pour certaines radiations : à savoir celles qui sont très voisines d'une raie d'absorption à dispersion

[1] Voir notamment : sir W. Thomson, *Conférences et Allocutions*, p. 385.

anomale sensible. Bien que la lumière ordinaire soit à peine déviée, il est alors naturel qu'aux environs de ces longueurs d'onde se manifestent de fortes déviations. L'observateur qui regarde le Soleil dans la direction OA (fig. 16) voit donc au-dessus de A, en *h*, des rayons anomalement dispersés provenant des régions voisines telles que B de la surface solaire. Le diamètre du Soleil relatif à ces radiations paraît plus grand qu'en lumière blanche, ou, ce qui revient au même, les

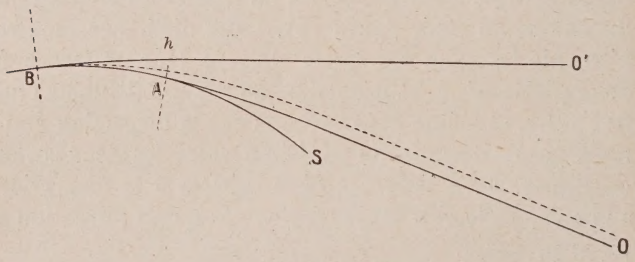


Fig. 16.

régions telles que B nous envoient un spectre de raies brillantes; ces raies brillantes ne coïncident pas exactement à vrai dire avec les raies de Fraunhofer correspondantes, mais elles en diffèrent très peu et peuvent facilement être confondues avec des raies d'émission.

Or c'est précisément là l'aspect que présente la chromosphère; on sait, en effet, que si l'on place la fente d'un spectroscope tangentiellement au bord solaire, les raies dites chromosphériques (hydrogène, hélium, H et K par exemple), noires dans le spectre ordinaire du disque, se renversent et deviennent brillantes.

M. Julius admet, au moins dans ses grandes lignes,

la théorie de Schmidt ; il considère que la surface critique n'a pas d'existence réelle et que les substances gazeuses que nous localisons dans la chromosphère ne sont que peu ou point lumineuses. Nous pouvons donc, dit-il, écarter l'hypothèse de la réalité d'une chromosphère où les vapeurs fortement lumineuses seraient distribuées *en couches distinctes*. En un mot, la chromosphère n'est pour lui qu'une illusion d'optique causée par la dispersion anomale.

On n'aurait plus lieu de s'étonner des différences présentées par le spectre de la chromosphère selon la distance du bord où l'on regarde. Le fait si étrange que pour un même élément certaines raies sont visibles jusque dans les régions élevées, d'autres seulement près du disque, n'a plus rien de mystérieux. Il n'y aurait dans tout cela que des manifestations diverses d'un phénomène assez capricieux.

5. — M. Julius va même plus loin. Si, au lieu de placer la fente tangentiellement au bord, on la place normalement, les raies chromosphériques brillantes affectent souvent une forme particulière : larges à la base, près du bord, elles vont s'effilant vers le haut en forme de flèche. La chose est surtout frappante pour l'hydrogène, comme le montre la figure 18 ; Julius l'explique de la façon suivante :

Si l'on suppose que la densité de la vapeur absorbante diminue à mesure que l'on s'élève au-dessus de la surface solaire, celle-ci agit comme un prisme à arête réfringente tournée vers le haut. Pour les rayons d'indice plus grand que 1 les choses se passent comme dans la figure. Si l'on se reporte à ce que nous avons

dit, les seuls rayons pour lesquels il en sera ainsi seront les rayons voisins des raies d'absorption correspondantes et situés du côté du rouge. Considérons une raie chromosphérique déterminée; immédiatement au-dessus de la surface solaire, il suffira d'une faible différence d'indice avec la lumière blanche (d'indice très voisin de 1 dans les gaz) pour que des rayons parviennent à l'observateur légèrement infléchis; ceux dont la longueur d'onde est franchement plus grande que celle de la raie d'absorption sont dans ce cas; leur dispersion anomale est, en effet, peu intense. Seuls semblent provenir des couches supérieures les rayons à indice notablement supérieur à l'unité, c'est-à-dire les plus voisins de la raie. Si donc l'on place la fente d'un spectroscope normalement au bord solaire, la raie brillante observée affectera la forme ci-contre (fig. 17).

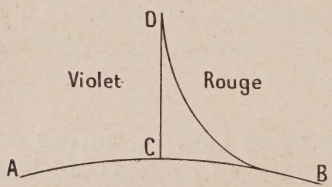


Fig. 17.

Le bord CD de la raie sera légèrement, mais très peu déplacé vers le rouge par rapport à la position centrale de la vraie raie d'absorption.

6. — Selon M. Julius, non seulement les rayons dont l'indice dépasse la valeur normale, mais aussi ceux d'indice exceptionnellement petit peuvent parvenir à l'observateur. Il suffirait, pour qu'il en soit ainsi, qu'il y ait au-dessus de A (fig. 16) de la vapeur dont la densité aille en croissant de bas en haut. On aurait alors

affaire à un prisme gazeux d'arête tournée vers le bas, et les rayons suivraient la marche indiquée par la figure et de B ils nous parviendraient encore. Les raies chromosphériques contiendraient aussi des rayons anomalement déviés voisins de la raie de Fraunhofer et du côté du violet; elles présenteraient donc bien l'aspect observé d'une flèche symétrique (fig. 18).

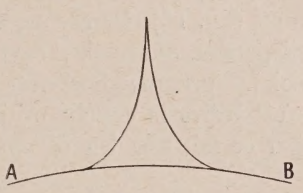


Fig. 18.

Il y aurait toutefois une légère différence sur laquelle nous reviendrons : la véritable raie de Fraunhofer continuerait à apparaître sous la forme d'une fine raie noire centrale, peut-être d'ailleurs imperceptible.

7. — Malheureusement, si cette seconde partie du raisonnement de Julius semble mieux faire cadrer la théorie avec l'observation, elle paraît bien peu vraisemblable. Il est difficile d'admettre que, dans l'état normal régulier de la chromosphère, la densité puisse croître de bas en haut; cela est contraire à tout ce que nous savons sur les atmosphères des astres et même au bon sens. Bien plus, Julius est amené à faire à la fois les deux hypothèses opposées afin d'expliquer la symétrie des raies « en fer de lance »; une densité croissante est nécessaire pour rendre compte d'une moitié de la raie, une densité décroissante pour l'autre moitié.

8. — M. *Hartmann*[1], qui a fait vivement ressortir la

[1] *Astr. Nach.*, t. CLXXV, nos 4197-4198, 1907, p. 349.

difficulté que nous signalons ici, va plus loin et ajoute : même si l'on admettait que le prisme gazeux pût avoir une arête tournée vers le Soleil, les rayons d'indice inférieur à l'unité ne pourraient absolument pas parvenir à l'observateur. En effet, pour qu'il en soit ainsi (fig. 16), les rayons tels que BAO, infléchis par la dispersion anormale, devraient avoir quitté la surface solaire presque horizontalement. Mais cette surface, c'est-à-dire la couche critique, est précisément définie par ce fait que les rayons blancs où n est voisin de 1

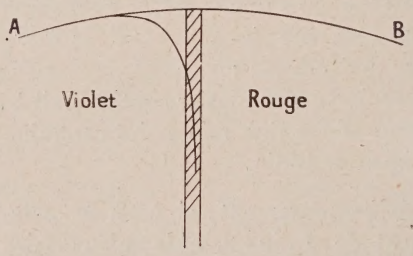


Fig. 19.

la quittent horizontalement; les rayons d'indice inférieur à l'unité ne sauraient alors prendre cette direction, et cela en vertu de leurs lois de réfraction[1]. Ils devraient au contraire suivre vers l'intérieur des trajectoires différentes de celles admises par Julius, et dans le spectre de la chromosphère ne figureraient plus les rayons voisins de la raie d'absorption et situés du côté du violet. De plus, comme ils n'auraient pu quitter horizontalement le bord solaire, ils manqueraient aussi dans le spectre du disque au voisinage du bord. En

[1] Voir plus haut : Théorie de Schmidt, p. 77.

plaçant radialement la fente du spectroscope, on trouverait donc aux raies de Fraunhofer l'apparence ci-contre (fig. 19), avec élargissement du côté du violet. Il est juste d'ajouter que rien de pareil n'a encore été constaté, mais la question ne pourra être tranchée que par l'emploi d'instruments très puissants.

9. — Ces remarques sont à rapprocher du travail que nous avons cité de *von Seeliger*, et d'après lequel le diamètre apparent du Soleil devrait être plus grand en lumière violette qu'en lumière rouge. Le phénomène n'a pas pu être mis nettement en évidence; mais dans la dispersion normale les radiations rouges et violettes ont une très faible différence d'indice, ce qui expliquerait l'échec des tentatives faites.

Dans le cas de la dispersion anomale, les rayons voisins des raies d'absorption et situés vers le rouge, très réfrangibles, peuvent ainsi nous parvenir à une plus grande distance apparente du bord solaire que les rayons blancs d'indice plus faible, et surtout que les rayons situés vers le violet encore moins réfrangibles. Mais comme la différence des indices est ici très considérable, il n'est pas impossible que l'observation décèle le phénomène. S'il en était autrement, on devrait en conclure que l'atmosphère solaire, dans le voisinage du bord, a une densité si faible que même les différences de réfrangibilité dues à la dispersion anomale deviennent inappréciables.

10. — Dans un ordre d'idées analogue, M. *Wilsing*[1] a publié un travail où, partisan des idées de

[1] *Astr. Nach.*, t. CLVI, nº 3735, 1901, p. 225.

Julius, il cherche à éclaircir le cas de la raie D_3 (hélium). On sait en effet que cette raie, présente dans le spectre de la chromosphère, ne figure pas dans le spectre de Fraunhofer. Elle offre de plus une apparence étrange : la fente étant radiale, D_3 est effilée des deux côtés et touche à peine le bord solaire. M. Wilsing explique au moins le premier de ces deux faits, en admettant que la couche d'hélium est très mince, si mince qu'elle ne produit pas d'absorption sensible.

Vue tangentiellement, son épaisseur peut néanmoins devenir considérable, ce qui justifierait l'apparition de la raie dans le spectre chromosphérique. Il est malgré tout singulier que la raie de l'hélium soit visible brillante dans le spectre de toutes les étoiles où les raies d'hydrogène le sont aussi, et manque complètement dans les spectres des étoiles qui ne contiennent que des raies sombres.

11. **Recherches expérimentales.**— Les tentatives de Julius pour expliquer la chromosphère ont donné lieu à bien des expériences de laboratoire dont les premières furent celles de *Wood* et *Ebert*[1], destinées à reproduire le spectre de la chromosphère, celui des protubérances et du spectre-éclair. Plus ou moins compliquées, ces recherches sont généralement fondées sur la méthode de Töpler; mais il ne faut pas oublier que ce ne sont là que de jolies expériences de physique, et qu'elles auraient besoin d'être confirmées en détail par des observations astronomiques précises.

[1] Wood, *Phil. Mag.*, juin 1901, page 551. — H. Ebert, *Astr. Nach.*, t. CLV, n° 3708, 1901, p. 177.

Il faudrait cependant être certain que les principales raies du spectre chromosphérique, celles du calcium, de l'hydrogène et de l'hélium manifestent effectivement une dispersion anomale particulièrement forte. Les recherches entreprises par *Wilsing* sur le calcium et l'hydrogène conduisirent, — peut-être faute de moyens appropriés, — à des résultats négatifs.

Mais plus tard la dispersion anomale, d'abord observée seulement sur les vapeurs d'iode, de sodium, de potassium, lithium et thallium, fut reconnue chez de nombreux éléments. *Lummer* et *Pringsheim*[1], avec l'arc électrique, l'étudièrent dans quelques raies des strontium, calcium et baryum.

Enfin citons les recherches plus récentes d'*Ebert*[2]; celui-ci, en vaporisant des métaux dans l'arc voltaïque entre un creuset de graphite et une tige de charbon, renvoyait horizontalement les rayons ainsi obtenus à l'aide d'un miroir; il était alors facile de les examiner au spectroscope. Ebert est arrivé à cette conclusion qu'aucune vapeur métallique n'est exempte de dispersion anomale; il nomme les éléments suivants : uranium, cérium, lanthane, argent, zinc, cuivre, fer et calcium. Les larges bandes des sels solubles présentent aussi la dispersion anomale. Il est à remarquer que, d'après Ebert, les raies d'absorption sont limitées du côté du rouge par un fond brillant intense, tandis qu'elles sont élargies du côté du violet. Ce phénomène, qu'on observe aussi dans les étoiles nouvelles, peut

[1] *Physik. Zeitschrift.*, t. IV, 1903, p. 430.

[2] *Astr. Nach.*, t. CLXII, n° 3877, 1903, p. 193, et même recueil, t. CLXIV, 1903, n° 3917, p. 65.

s'expliquer par la réfraction anomale (ainsi que nous l'avons vu).

12. — Le progrès le plus important fut réalisé dans cette étude par *Puccianti*[1] qui, renonçant à la méthode des spectres croisés de Kundt, se servit de l'interféromètre pour reconnaître les variations d'indices. Il construisit ainsi des courbes fort instructives d'indices en fonction de la longueur d'onde, et reconnut la dispersion anomale sur plus de 100 raies appartenant à des corps divers[2].

Toutes ces recherches ayant révélé la dispersion anomale de la vapeur de calcium, on pourrait croire affaiblie l'objection de Wilsing. Il n'en est rien : le phénomène est bien plus compliqué qu'on ne pourrait le penser à première vue. *Lummer* et *Pringsheim* ne l'observent que près de la raie λ 423 du calcium (*g* de Fraunhofer), et il ressort des travaux de Puccianti que cette raie présente une dispersion anomale beaucoup plus marquée que λ 397 et λ 393 (raies H et K du spectre solaire). Or H et K, dans le spectre de la chromosphère et dans celui des protubérances, sont incomparablement plus fortes que *g*, contrairement à ce qui a lieu le plus souvent au laboratoire.

13. — On ne peut cependant pas dire qu'il y ait là un argument décisif contre la théorie de Julius. On sait en effet que l'absorption varie beaucoup avec la température, la pression, et en général les circonstances où elle prend naissance; il en est de même de la dispersion

[1] *Spett. Ital.*, t. XXXIII, 1904, p. 133.
[2] *Nuovo Cimento*, t. LIX, 1905, p. 303.

anomale, et celle-ci peut dans certains cas devenir plus forte pour certaines raies et moins pour d'autres. N'oublions pas que les expériences faites l'ont toujours été à des températures relativement basses.

Et dans le Soleil, la matière se comporte peut-être différemment; le fait même que les raies H et K y sont si intenses suffit à le prouver.

14. **L'éclipse de Sumatra.** — *Wilsing* fait remarquer en outre le léger déplacement des raies causé par l'action unilatérale du phénomène. Julius répond à l'objection, comme nous l'avons vu, en expliquant à sa façon la symétrie des raies en fer de lance, qui devraient alors plutôt paraître doubles. Et il pense en trouver une preuve[1] dans les résultats si souvent discutés de l'expédition hollandaise de Sumatra (éclipse totale de mai 1901). Toutes les raies du spectre-éclair, c'est-à-dire les raies brillantes de la couche renversante dont l'absorption produit le spectre solaire ordinaire, parurent doubles durant le court instant où il est possible de les observer. Des photographies furent prises qui témoignent, paraît-il, du fait. Il faut dire cependant que bien des astronomes[2] attribuent la particularité constatée soit à une imperfection de la mise au point des appareils, soit tout simplement à un léger déplacement de ceux-ci pendant la pose. La duplication des raies du spectre-éclair ne se montre pas, en

[1] *Physik. Zeitschr.*, t. III, 1901, p. 154. — *Astroph. Journal*, t. XV, 1901, p. 28; et aussi *Physik. Zeitschr.*, t. IV, 1902, p. 132. — *Archives néerlandaises*, t. VIII, p. 218, 1902. — *Astr. Nach.*, t. CLX, n° 3824, 1902, p. 139.

[2] Voir, notamment, J. Hartmann, *Astr. Nach.*, t. CLXXIV, n° 4175, 1907, p. 353, et *Physik. Zeitschr.*, t. VIII, p. 379, 1907.

effet, sur toutes les épreuves de ce spectre obtenues par les différentes missions, comme cela devrait être si l'anomalie n'était pas de nature instrumentale.

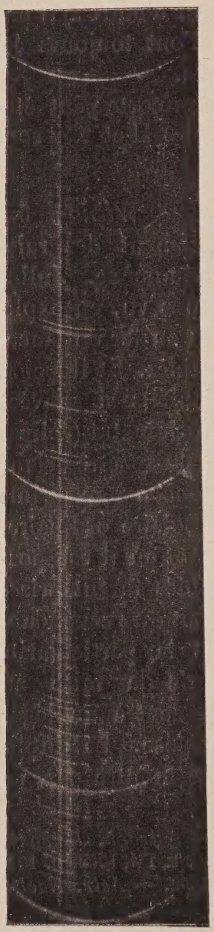


Fig. 20. — Le « Spectre-Éclair » obtenu avec un prisme-objectif un instant avant une éclipse totale : les raies de Fraunhofer apparaissent renversées, c'est-à-dire brillantes.

D'ailleurs pour que les clichés de l'éclipse de Sumatra corroborent les idées de M. Julius, il faudrait évidemment qu'ils soient inexplicables avec les anciennes théories de la chromosphère. Or celles-ci admettent l'existence d'une couche extérieure plus froide que les vapeurs chromosphériques incandescentes. L'absorption de cette couche pourrait parfaitement produire une fine ligne noire centrale. Et l'observation de Sumatra ne prouverait pas grand'chose.

15. — Une dernière remarque s'impose. Le Soleil est assurément à une température fort élevée, de l'ordre de 6000°. Les vapeurs de la chromosphère sont donc, sans aucun doute, très chaudes par rapport à nos températures terrestres habituelles. On ne voit alors pas

pourquoi on leur refuserait tout pouvoir émissif afin d'invoquer la dispersion anomale. Après tout, l'explication généralement admise par les autres théories de la chromosphère n'a rien que de très vraisemblable, et il reste fort probable qu'elle suffit à rendre compte de la plupart des apparences connues.

16. **Application aux taches.** — M. Julius a aussi appliqué sa théorie aux spectres des taches solaires[1]. Les raies de Fraunhofer se montrent dans ces spectres, comme on le sait, élargies pour la plupart.

Quant aux taches elles-mêmes, M. Julius les considère comme dues à des irrégularités dans la densité de la matière gazeuse solaire. Il adopte d'une façon générale la théorie de M. *Emden* au sujet de l'équilibre hydrodynamique du Soleil, théorie que nous résumerons plus loin[2]. Disons seulement que le mélange gazeux en rotation doit présenter une structure stratiforme; les diverses couches glissant et frottant les unes sur les autres sont séparées par des « surfaces de discontinuité », dont la constitution de la couronne (aux époques de minimum d'activité notamment) serait l'image. Les feuillets des surfaces de discontinuité, peu inclinés sur l'équateur aux faibles latitudes, se projettent sur le disque suivant des zones parallèles à l'équateur solaire. Enfin Julius admet que, sur ces surfaces, des tourbillons plus ou moins tubulaires prennent naissance par suite du frottement des couches les unes sur

[1] *Astr. Nach.*, t. CLIII, 1901, n° 3672, p. 443.
[2] Voir ce volume, p. 216.

les autres. Ce sont ces tourbillons qui constituent, d'après lui, le phénomène objectif dont les taches ne seraient que des manifestations secondaires.

17. — Pour faire comprendre comment cette nouvelle « illusion d'optique » peut se produire, M. Julius choisit une tache du milieu du disque solaire. Nous avons dit qu'il admettait la théorie de Schmidt; pour simplifier, il remplace les couches profondes très lumineuses qui doivent se trouver à l'intérieur du Soleil par un véritable noyau N (fig. 21) à rayonnement intense, d'un diamètre à peu près égal à la moitié de celui de la surface critique (photosphère). La tache se projetant en P, la direction PA représente l'axe d'un tourbillon dirigé vers l'observateur; cet axe est évidemment une ligne de densité minima, et si l'indice de réfraction est supérieur à l'unité le tourbillon produira l'effet d'une lentille divergente et la quantité de lumière qui arrive à la terre dans cette direction est diminuée. La « tache » paraîtra donc un point sombre sur la surface du Soleil.

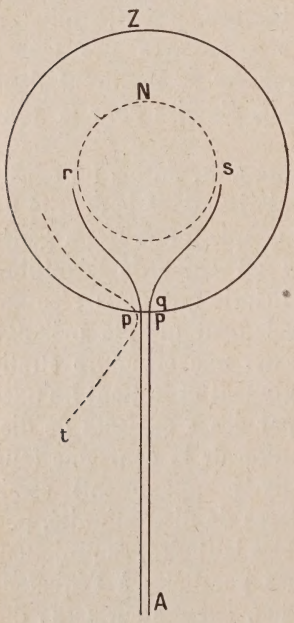


Fig. 21.

D'autre part, par suite de leur réfraction plus grande, les rayons voisins d'une raie de Fraunhofer sujets à la dispersion anomale sont rejetés à droite et à gauche de la tache et manquent dans le spectre ; d'où élargissement des raies sombres correspondantes.

18. — Cette théorie est loin d'être à l'abri de toute objection ; on se rend d'ailleurs compte qu'elle nécessite bien des hypothèses souvent hasardeuses.

Tout d'abord, d'après la théorie de Schmidt, un noyau tel que N ne serait pas vu de la tache P sous un angle limité $r\hat{P}S$, mais bien sous un angle voisin de 180°. En effet, les rayons émis par le bord du noyau entrent dans la couche critique Z tangentiellement après avoir parcouru des trajectoires plus ou moins spiraliformes. Vu de P, le noyau semble ainsi remplir tout l'espace intérieur. Mais, dans ce cas, il est impossible de constater un effet de dispersion, quel qu'il soit : On n'observe pas de dispersion si l'on se contente de tenir un prisme devant une surface blanche illimitée (comme le serait alors le noyau) ; il faut au moins que celle-ci ait un bord bien tranché. Et si l'on passe sur cette grave objection en tenant pour exactes les trajectoires *rp* et *sq*, on s'aperçoit que la tache devrait paraître non pas obscure, mais excessivement lumineuse par suite de la concentration de toute la lumière du noyau dans la direction PA.

19. — Ce n'est pas tout. Les taches centrales devraient nécessairement être privilégiées et plus nombreuses que les autres, et il n'en est rien. Enfin lorsque, par suite de la rotation d'une tache ainsi pla-

cée, l'observateur se trouverait dans une direction telle que *pt*, les rayons blancs ne lui parviendraient plus du noyau, mais bien les seuls rayons anomalement dispersés. Il y aurait donc apparition de raies brillantes. Il ne faut pas oublier, en effet, que la dispersion anomale ne supprime pas les radiations qui la subissent; elle les dévie seulement vers une autre région de l'espace, et à une raie noire plus ou moins élargie doit correspondre quelque part, dans un autre azimut, une raie brillante.

20. — Tout ce qui précède ne veut pas dire que la dispersion anomale ne joue aucun rôle dans les taches, mais simplement que leurs principaux caractères ne sauraient s'expliquer à la manière de M. Julius. Les recherches les plus récentes de *Hale* et *Adams* [1] ne leur ont d'ailleurs révélé aucun signe de dispersion anomale, et semblent plutôt favorables aux théories anciennes.

21. **Les protubérances**. — L'explication des protubérances par la théorie de Julius semble à première vue beaucoup plus heureuse [2]. D'après les idées universellement répandues, les protubérances sont des éruptions de gaz incandescents qui s'élèvent parfois à de grandes hauteurs au-dessus du bord solaire. Leurs vitesses peuvent atteindre plusieurs centaines de kilomètres par seconde. Les composantes radiales du mouvement, obtenues en mesurant les déplacements des

[1] *Astroph. Journ.*, t. XXV, 1907, p. 75.

[2] *Physik. Zeitschr.*, t. IV, 1902, p. 85, et *Arch. néerl.*, t. VIII, 1902, p. 218.

raies correspondantes et en appliquant le principe de *Döppler*, sont du même ordre de grandeur, alors que la troisième composante, celle située dans le plan du méridien solaire et normale au rayon visuel, est tou-

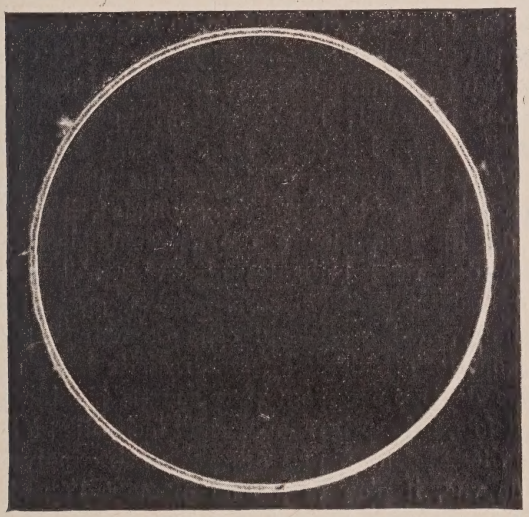


Fig. 22. — Les protubérances de la chromosphère, d'après un cliché fait à Meudon.

jours beaucoup plus faible. En admettant la théorie éruptive, il doit y avoir des différences de densité considérables à l'intérieur des protubérances et des régions voisines; l'observateur voyant à travers ces masses gazeuses le bord solaire situé en arrière, il est incontestable que la dispersion anomale peut entrer en jeu, absolument comme pour la chromosphère. Mais il y a

loin de là à penser que le phénomène tout entier n'est qu'une illusion d'optique.

22. — M. Julius cependant repousse, comme nous l'avons vu, l'idée de vapeurs distribuées en couches distinctes. De plus, des vitesses de 200 ou 300 kilomètres par seconde lui paraissent inadmissibles et contraires à toutes nos notions physiques. Il admet que dans tout le Soleil, abstraction faite des variations de densité, tous les corps simples sont étroitement mélangés, et les raies protubérantielles étant, d'après lui, produites par la dispersion anomale[1], il est illusoire de les rapporter à des éléments isolés. La lumière des raies brillantes observées n'étant plus celle des raies d'émission correspondant aux raies de Fraunhofer, mais seulement celle de radiations voisines, tous les calculs de vitesses radiales basés sur le principe de Döppler n'ont plus aucune signification.

Toutefois, si l'esprit renonce assez facilement à l'idée de ces vitesses fantastiques des gaz solaires suivant la ligne de vue, il n'en va pas de même à l'égard des déplacements dans le sens perpendiculaire. Il suffit d'observer une protubérance[2] en mettant la fente du spectroscope grande ouverte tangentiellement au bord, pour comprendre l'opinion presque unanime des astronomes. La seule vue du phénomène semble attester sa réalité. On croit voir la trombe ou le jet enflammé monter, et la forme des protubérances est également bien frappante.

[1] *Astroph. Journal*, 1905, t. XXI, p. 279 et *loc. cit.*
[2] Par exemple avec la raie rouge C de l'hydrogène.

23. — M. Julius objecte la formation de protubérances nébuleuses loin du bord du Soleil, le calme plat auquel font place les éruptions les plus violentes, et pour expliquer les faits il se sert de la théorie d'*Emden*.

La chromosphère, simple continuation de la photosphère, possède une structure déterminée par les vagues et les tourbillons qui se propagent dans les surfaces de discontinuité. Au sein de ces tourbillons doivent régner de grandes différences de densité; ceux-ci donnent donc lieu, bien plus que les couches de densité uniforme qui les séparent, à la dispersion anomale de la lumière blanche qui les traverse. Ils doivent donc nous apparaître lumineux et dirigés suivant les génératrices des surfaces de discontinuité.

Ce qui précède expliquerait l'apparence de prairie touffue que présente, dans les grands instruments, la chromosphère. Les « brins d'herbe » seraient l'image de tourbillons relativement petits, continuellement formés par l'enroulement des surfaces de discontinuité dans l'océan solaire. Les protubérances proprement dites ne seraient que les tourbillons plus puissants causés par des vagues plus fortes et aussi moins nombreuses. Comme le passage d'une vague à l'état de tourbillon commencera, en général, par les régions voisines de l'axe de rotation, pour se propager ensuite vers l'extérieur, les images observées sembleront se propager également dans ce sens. Si l'on se reporte à la figure 32, page 225, on comprendra que les protubérances dans cette théorie nous apparaissent généralement à peu près normales au bord solaire.

24. — Passons maintenant aux objections. La dispersion anomale est toujours liée à une absorption intense ; on ne voit pas alors pourquoi les raies en question n'auraient pas un pouvoir émissif qui suffirait, sans aller plus loin, à justifier leur apparition. D'ailleurs un mélange gazeux ne donne pas à la fois, dans un tube de *Geissler*, les raies de tous les gaz composants ; il peut très bien en être de même dans l'atmosphère solaire, d'autant plus que plusieurs astrophysiciens éminents seraient assez portés à attribuer une origine électrique à la lumière des protubérances.

25. — Mais, aussi bien contre l'explication de Julius que contre la possibilité envisagée ici d'une émission sélective, vient s'élever une objection fort sérieuse. Dans les deux cas, en effet, les protubérances tout entières devraient avoir le même spectre, puisque leur visibilité ne dépend, d'après Julius, que des différences de densité de l'atmosphère solaire. Or il n'en est rien : leur forme n'est pas toujours la même, par exemple quand on l'observe dans la raie rouge C (hydrogène) et dans la raie jaune D_3 (hélium). Les protubérances ne sont donc pas causées par de petites hétérogénéités d'une masse gazeuse uniformément distribuée par ailleurs, mais elles ont, en partie tout au moins, une existence réelle : elles ne peuvent consister qu'en courants gazeux de composition variable avec les endroits, ce qui exclut l'idée d'un mélange intime.

26. — Reste à savoir si ces courants gazeux ont une lumière propre ou s'ils ne font que transmettre à la terre, après dispersion anomale, la lumière blanche du Soleil.

Soit P un point d'une protubérance (fig. 23) dont l'image est projetée en O, par un objectif, sur la fente d'un spectroscope. Si la théorie de Julius était vraie, le rayon qui nous arrive PO se composerait d'un groupe de rayons tels que CP, BP, AP, qui par dispersion anomale prendraient tous la direction PO. Quelles espèces de radiations aurons-nous en O? Le rayon le

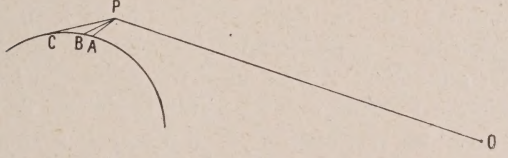


Fig. 23.

moins dévié CP, celui dont l'indice de réfraction diffère le moins de 1, et dont, par suite, la longueur d'onde diffère le plus de celle correspondant à la raie de Fraunhofer, est tangent extérieurement à la surface du Soleil. Tous les autres, d'indices plus grands, sont plus voisins du milieu de la raie de Fraunhofer et suivent des trajets tels que BPO, APO... La lumière de tous ces rayons devrait figurer dans celle du rayon PO et avoir à peu de chose près la même intensité.

Si donc les raies des protubérances étaient dues à la dispersion anomale, elles ne présenteraient jamais de simples déplacements, — ce qui aurait lieu si l'effet Döppler-Fizeau était seul en cause, — mais elles devraient toujours paraître élargies. Or les observations ont révélé les deux espèces de phénomènes : élargissement et simple déplacement de raies fines. Le

P. Fényi, notamment, a même observé[1], en 1891, une vitesse de plus de 800 kilomètres dans la direction de la ligne de vue; de plus, le déplacement des raies était vers le violet, sens qui, avec la théorie de Julius, correspond à des couches de vapeurs de plus en plus denses à mesure que l'on s'élève au-dessus de la photosphère. Et nous avons vu que l'existence de tels rayons était invraisemblable. Il résulte d'ailleurs des observations que les déplacements de raies fines sans élargissement, — phénomène inexplicable par la dispersion anomale, — sont aussi fréquents que les élargissements. Si donc l'on admettait la théorie de Julius pour certaines protubérances, il resterait à chercher, pour les autres, une explication différente.

27. — Dans une ingénieuse expérience de laboratoire[2], M. *Julius* a cherché à montrer que, dans le voisinage d'une raie à dispersion anomale, on pouvait avoir toutes les distributions de lumière que l'on voulait, en particulier les simples déplacements de raies de tout à l'heure. Il faisait traverser à un pinceau lumineux très étroit un prisme de vapeur de sodium. Il supprimait ensuite certaines portions du spectre anomal ainsi obtenu à l'aide d'un diaphragme arbitrairement disposé. Si l'on concentre alors sur la fente d'un spectroscope la lumière qui a traversé le diaphragme, on n'obtient naturellement pas les radiations arrêtées. On peut objecter qu'il y a une différence profonde entre les conditions de cette expérience et celles

[1] *Spett. Ital.,* t. XXI, 1892, p. 127.
[2] *Astroph. Journal,* t. XXV, 1906, p. 95.

qui peuvent se trouver réalisées dans le Soleil. Les faisceaux lumineux étroitement limités et les diaphragmes compliqués ne sauraient en effet y jouer aucun rôle.

28. — Il n'est pas impossible cependant que la dispersion anomale permette d'expliquer les élargissements de raies. Ces élargissements, parfois observés, correspondraient, dans la théorie de Döppler, à des vitesses différentes et simultanées de masses gazeuses situées l'une derrière l'autre. Pour savoir laquelle des deux explications est la bonne, il suffirait de mesurer les déplacements respectifs des différentes raies protubérantielles. Si l'explication de la théorie éruptive est juste, les divers déplacements doivent correspondre aux mêmes vitesses radiales et être, par suite, proportionnels aux longueur d'onde ; il doit en être de même pour la largeur des raies. Mais, dans la théorie de Julius, il ne peut en être ainsi : la largeur d'une raie ne doit plus dépendre de la longueur d'onde, mais de l'intensité de la dispersion anomale dans le voisinage de cette raie. La question n'a pas encore été tranchée par l'observation ; il faut dire que les raies des protubérances sont en général d'autant plus faciles à apercevoir, que la longueur d'onde est plus forte. Il est plus aisé de reconnaître une protubérance avec la raie D_3 qu'avec F ; plus encore avec C qu'avec D_3. La remarque faite n'est donc pas aussi facile à appliquer pratiquement qu'elle peut le paraître à première vue ; les observations n'en sont pas moins possibles.

29. — On pourrait encore noter que les vitesses de plusieurs centaines de kilomètres par seconde ne

répugnent à l'esprit que par suite de l'inertie relativement forte de la matière, telle que nous la connaissons, soit sur la terre, soit dans le ciel[1]. Mais la densité des gaz chromosphériques est peut-être très faible, et des expériences récentes, — sur les rayons canaux du tube de Crookes et sur les rayons α du radium, — ont montré qu'il était parfaitement possible à des atomes matériels de prendre des vitesses plus grandes encore, par exemple des milliers de kilomètres par seconde.

3o. — **Les facules et les flocculi.** — M. Julius explique les facules brillantes qui environnent les taches par un phénomènes inverse de celui qu'il admet pour ces dernières ; les tubes tourbillons des surfaces de discontinuité, agissant en leurs centres comme des lentilles divergentes, condensent au contraire la lumière du noyau par leur périphérie. Il est évident que cette interprétation se heurte également aux objections exposées à propos des taches. Aussi nous occuperons-nous ici d'un autre point important.

On sait que les facules ne se montrent jamais quand les taches correspondantes sont au milieu du disque, bien que même alors on puisse parfois les soupçonner.

Ce n'est que lorsqu'une tache est voisine du bord que les facules apparaissent nettement, et l'on pourrait songer à rattacher ce fait aux idées de Julius.

[1] Et même les vitesses de 300 kilomètres par seconde ne sont nullement écartées par les astronomes qui en observent parfois de cet ordre dans les étoiles.

Il n'y aurait cependant pas là une preuve de l'action de la dispersion anomale.

Les épreuves spectrohéliographiques de MM. *Hale* et *Deslandres*[1] ont en effet montré que le phénomène faculaire est beaucoup plus général et surtout plus

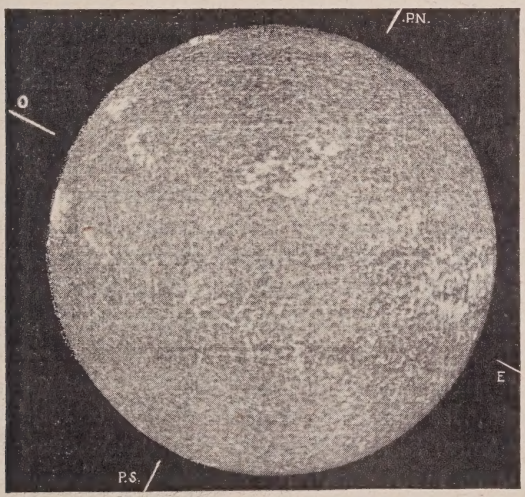


Fig. 24.
Les « flocculi » du calcium, d'après un cliché obtenu à Meudon par M. Deslandres.

étendu dans l'atmosphère, que l'observation ordinaire limitée à la surface ne le fait prévoir. Non seulement les taches sont partout environnées de facules, qu'elles soient ou non au bord du disque, mais la chromosphère entière est parsemée de petits nuages incandescents qui coïncident avec les facules là où la compa-

[1] Deslandres, *Annuaire du Bureau des Longitudes* de 1907.

raison peut se faire. Ces nuages de vapeurs, formés principalement sans doute de vapeurs de calcium, couvrent toute la surface solaire ; ils font partie de la chromosphère et forment ce qu'on appelle le réseau chromosphérique ou des flocculi. Tous ces faits montrent donc bien que si les facules se voient surtout au bord du disque, ce n'est que grâce à l'éclat plus faible du fond lumineux où elles se projettent[1] ; on sait en effet que le Soleil est plus éclatant au centre qu'aux bords. Toute idée d'une origine purement optique se trouve par là même écartée.

31. — Cependant bien que les clichés dont nous parlons semblent révéler un lien très étroit entre les facules et les flocculi, — qui paraissent des prolongements des facules, — M. *Hartmann* serait plus disposé à admettre l'explication de Julius pour les flocculi. Il est indiscutable, dit-il, que la surface solaire est formée de plages d'éclats très différents, telles que, par exemple, les grains de riz, les taches et les facules elles-mêmes. Si au-dessus d'elles se trouve une couche gazeuse en mouvement, parsemée d'inégalités de densité, l'observateur recevra tour à tour des rayons normalement et anomalement réfractés par cette couche, et provenant des plages éclairées de la couche inférieure. Le réseau des flocculi ne proviendrait alors pas de vapeurs lumineuses par elles-mêmes, mais seulement du passage de la lumière blanche du réseau photosphérique sous-jacent à travers les irrégularités

[1] De plus, elles n'apparaissent guère, comme les taches, que dans deux zones voisines de l'équateur solaire et situées de part et d'autre. Les facules voisines des pôles sont rares.

de la couche supérieure non lumineuse. Le réseau sombre d'hydrogène découvert par *Hale* se laisserait bien expliquer de cette façon. Les rapides variations des flocculi rendent la question difficile à élucider entièrement. On pourrait peut-être y parvenir indirectement. Les recherches spectrales sur la chromosphère et les protubérances peuvent permettre de discerner les effets de dispersion anomale de ceux attribuables à la température et à la pression de l'atmosphère solaire. Il ne s'agirait plus alors que de rechercher si la lumière des flocculi correspond bien à celle des raies à forte dispersion anomale.

32. — **Le spectre solaire anormal de Hale.** — M. *Hale* a publié, en 1902, la description d'un phénomène inusité qui cadre assez bien avec la théorie de Julius. Il s'agit de modifications aussi extraordinaires qu'imprévues, que subit parfois le spectre solaire ordinaire pendant un temps très court.

Des photographies prises sur une même plaque, à courts intervalles, révèlent alors, encadré entre les spectres normaux obtenus avant et après la perturbation, un spectre anormal caractérisé par les faits suivants :

1° Un grand nombre de raies de Fraunhofer sont considérablement affaiblies ; plusieurs même complètement effacées ;

2° Certaines autres sont extraordinairement renforcées ;

3° Enfin certaines raies présentent des déplacements notables.

On admet habituellement que ces anomalies ont

pour origine des perturbations de nature plus ou moins cyclonique. M. Julius fait remarquer que les raies plus ou moins affaiblies sont justement celles qui correspondent aux raies chromosphériques les plus brillantes. La dispersion anomale permettrait, d'après lui, de rendre compte sans hypothèse spéciale de ces phénomènes bizarres.

33. **La période undécennale des taches.** — On sait que le nombre et l'étendue totale des taches varient d'année en année. Le phénomène a une période de onze ans environ, et nous en reparlerons au sujet de son influence sur le magnétisme terrestre. On aurait difficilement songé à considérer ce retour périodique de l'activité solaire comme le résultat d'apparences trompeuses; M. Julius a cependant émis cette hypothèse que la périodicité pourrait provenir du simple déplacement astronomique de la terre sur son orbite[1].

Le savant hollandais part de la théorie d'*Emden* et considère l'état de la matière dans le Soleil comme sensiblement invariable dans un laps de quelques années.

Les diverses couches du Soleil gazeux doivent, selon la théorie citée, avoir des périodes de révolution différentes. L'observation montre cependant que, parmi ces périodes synodiques, il y en a une plus nette que toutes les autres : c'est celle qui apparaît dans l'étude des taches et des facules ; nous l'appellerons T et nous savons qu'elle est à peu près de vingt-six jours.

[1] *Arch. néerl.*, t. VIII, 1903, p. 390, et t. IX, 1903, p. 211. Et aussi *Astroph. Journal*, t. XXI, 1905, p. 278. L'article en français cité (*Revue générale des sciences*, 1903) contient en détail l'exposé de cette théorie.

34. — Considérons un point situé dans le plan équatorial du Soleil, et dont la période de révolution synodique soit égale à T exactement; concevons de plus une surface sphérique Σ passant par ce point, et concentrique au Soleil. Faisons tourner uniformément cette sphère autour de l'axe du Soleil, de telle sorte que la durée d'une révolution synodique soit de T.

Cette surface sphérique Σ est ce que M. Julius

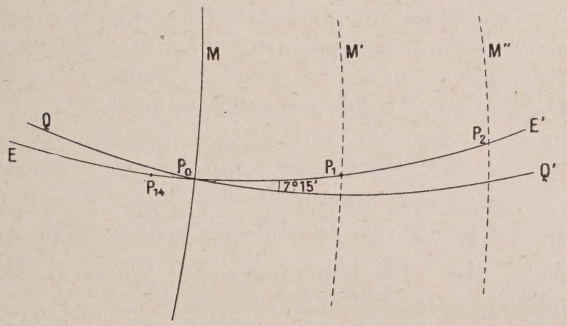


Fig. 25.

nommera le « Soleil tournant » ; mais on ne doit pas oublier que les diverses couches gazeuses peuvent parfaitement se déplacer par rapport à celle-là.

Considérons la droite joignant les centres de la terre et du Soleil. Cette droite perce la sphère Σ en un point P que l'on peut appeler projection de la terre sur le Soleil, et que nous suivrons dans son déplacement sur Σ.

L'équateur solaire est incliné sur l'écliptique de 7°15′, et c'est le 4 juin et le 6 décembre que la terre passe par la ligne des nœuds. Appelons EE′ l'écliptique, QQ′ l'équateur solaire.

Le 4 juin, la projection de la terre est en P_0; menons en ce point le méridien origine M. Au bout d'un temps T, M a accompli une révolution synodique; P est alors en P_1, après avoir décrit sur le Soleil une spire complète, plus un arc correspondant à la distance de M' à M. P continuera pendant la seconde période T sa course sur le Soleil, pour se retrouver en P_2 à la fin de cette période. Au bout de quatorze périodes T il sera revenu dans le voisinage de P_0, mais ne coïncidera pas exactement avec lui, et c'est là le nœud de la question.

Quelle sera la différence entre P_{14} et P_0? Il est évident que cette différence dépend directement de la valeur admise pour T. Or ce chiffre oscille entre $25^j,47$ et $26^j,68$ lorsque l'on étudie le tableau des vingt-six valeurs relevées par M. Julius dans les publications astronomiques, et obtenues soit par des observations magnétiques, soit par des données météorologiques. La moyenne de ces deux chiffres est $T = 25^j,924$, chiffre qui présente une coïncidence frappante avec celui ($25^j,929$) que MM. *Ekholm* et *Arrhenius* ont tiré des observations d'aurores polaires de 1722 à 1896, et qui passe pour un des mieux établis.

Or $14 \times 25^j,924 = 362^j,936$. Comme l'année sidérale est de $365^j,256$, il y a un écart de $2^j,32$.

Au bout de onze ans, — exactement $\frac{25,924}{2,32} = 11,17$, — le méridien du point P_{14} reviendra donc coïncider sensiblement avec celui de P_0, et nous nous retrouverons à peu près en face des mêmes génératrices des surfaces de discontinuité d'Emden, c'est-à-dire en face des mêmes régions fertiles en taches.

35. — Il y a plus : la période synodique T ne peut pas se manifester avec précision par l'observation des taches, puisque, à chaque révolution synodique du Soleil, le point P change de latitude héliographique.

Toutefois, si l'état et la distribution de la matière solaire restaient à peu près stationnaires, la droite réunissant le centre de la terre à celui du Soleil parcourrait, après onze ans, dans le système optique gazeux, à très peu de chose près les mêmes positions.

En réalité, il n'en est vraisemblablement pas ainsi, et l'on doit admettre qu'il se produit à la longue, dans la masse solaire, des modifications réelles mais non nécessairement périodiques, qui se combinent avec les effets de déplacement décrits; ces derniers représenteraient seuls, pour M. Julius, la partie périodique du phénomène undécennal.

36. — Il convient d'ajouter que la théorie précédente n'est pas donnée par son auteur comme indiscutable ; les oscillations de l'activité solaire pourraient fort bien, M. Julius ne le nie point, — être dues à des phénomènes réels ayant leur siège dans le Soleil. Mais il lui paraît préférable de ne pas introduire cette hypothèse selon lui non indispensable.

CHAPITRE III

TEMPÉRATURE DU SOLEIL ET ENTRETIEN DE SON RAYONNEMENT CALORIFIQUE

LA TEMPÉRATURE DU SOLEIL

1. — La recherche de la température probable du Soleil n'a guère été faite avec quelque précision que depuis 1837, époque où *J. Herschel* et *Pouillet* entreprirent de mesurer la quantité de chaleur rayonnée par le Soleil en un temps donné. C'était là, sans nul doute, un acheminement vers la solution du problème.

2. **Constante solaire.** — *Pouillet* a donné le nom de « constante solaire », — et cette désignation a été consacrée depuis par l'usage, — à la quantité de chaleur exprimée en petites calories que le Soleil nous envoie sous l'incidence normale par centimètre carré de surface et par minute. On se doutait alors, en effet, que la détermination précise de ce chiffre fournirait sur la température solaire une donnée de première importance. La relation entre les deux grandeurs est encore plus immédiate qu'on ne l'aurait soupçonné,

moyennant cependant une définition de pure rigueur dont nous parlerons. Tous les efforts doivent donc tendre, en définitive, à obtenir de la constante solaire une valeur digne de foi. Ce problème est, pour la science moderne, identique à celui de la température du Soleil.

L'appareil de *Pouillet* [1] était simplement formé, en principe, d'une boîte d'argent cylindrique plate, noircie sur une des bases, polie partout ailleurs. La boîte étant pleine d'eau, il suffisait d'exposer la face noircie normalement aux rayons solaires et de lire sur un thermomètre *ad hoc* l'élévation de température de l'eau en un temps fixé pour avoir la valeur de la constante solaire. Pouillet trouva ainsi $1^{cal},7633$. *Sir John Herschel*, par un procédé analogue, arriva à des résultats un peu plus forts.

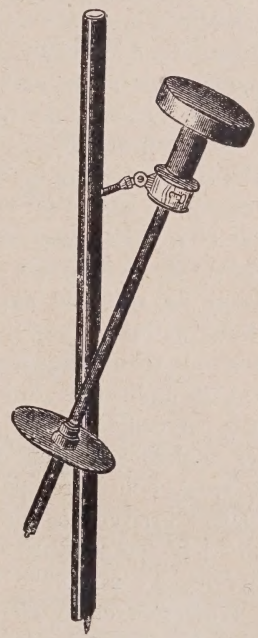


Fig. 26. — Actinomètre de Pouillet.

3. **Premières estimations**. — La question qui se posait était alors de savoir, étant donné ces résultats, quelle température ils conduisaient à attribuer au Soleil.

[1] *C. R.*, t. VII, p. 24.

En d'autres termes, étant donnée la quantité de chaleur qui nous est envoyée d'un corps chaud par unité de surface et par unité de temps, quelle est la température de ce corps? Malheureusement ce problème théorique, qu'on l'envisage au point de vue thermodynamique ou au point de vue expérimental, est hérissé de difficultés, et, au temps de Pouillet, il était loin d'être résolu.

On n'avait sur le rayonnement que des données fort incertaines, basées sur la loi du refroidissement proportionnel à la température de *Newton*, ou sur celle de *Dulong* et *Petit*. Cette dernière n'était qu'une généralisation de résultats expérimentaux : elle consistait à admettre que, quand la température croît en progression arithmétique, la radiation croît en progression géométrique. Pouillet arriva, en suivant cette règle, à des nombres compris entre 1461° et 1761°. Ces chiffres suffisaient à montrer la fausseté de la loi puisque, concentrés par une forte lentille, les rayons solaires arrivent à fondre les corps les plus réfractaires; la température du Soleil est donc évidemment supérieure à 2000°.

Waterston et le *P. Secchi*[1], en s'appuyant sur la loi de Newton, tombèrent dans l'excès contraire et attribuèrent au Soleil des températures de 7156000° C. et 10000000° C., tandis qu'*Ericsson*, en Amérique, par un tout autre procédé, arrivait à 4000000°.

4. — Un raisonnement simple[2] de *Sir W. Thomson* permettait cependant d'éviter ces exagérations. La cha-

[1] Waterston, *Phil. Mag.*, 4e série, vol. XXIII, p. 505, 1860; Secchi, *Nuovo Cimento*, t. XVI, p. 294.

[2] Ce raisonnement n'a aucune prétention à la rigueur; il se

leur rayonnée par mètre carré de la surface du Soleil équivaut seulement en effet à 76500 chevaux vapeur par minute, en employant le chiffre de Pouillet. Or on obtiendrait la même quantité de chaleur en faisant brûler un peu moins de 5 kilogrammes de houille par mètre carré de la surface solaire, et cela toutes les deux secondes. Mais les fourneaux de locomotives [1] ordinaires consomment cette même quantité de charbon dans des temps variant entre 30 et 90 secondes par mètre carré de grille. Le Soleil, considéré comme foyer calorifique, ne vaut donc, à surface égale, guère plus de 15 à 45 fois les foyers de locomotive, ce qui suffit à faire voir que sa température superficielle ne doit être que de quelques milliers de degrés, sûrement pas 60000°.

5. **Température effective.** — Pendant qu'on se rapprochait peu à peu de la vérité, M. Violle, en 1876, montrait la nécessité de préciser la notion de température du Soleil; les diverses parties de l'astre ne sont pas, en effet, à la même température [2]. On convient alors d'appeler « température effective » celle qu'aurait un corps noir, c'est-à-dire une surface qui absorberait également et totalement toutes les radiations si, placé à la distance du Soleil, il nous envoyait précisément la quantité de chaleur correspondant à la valeur observée de la constante solaire [3]. Cette « température effective »

fonde sur une conception du Soleil qui est inexacte, mais cela n'empêche pas qu'il peut donner l'ordre de grandeur de la température cherchée.

[1] Rankine, *Prime Movers*, p. 285.

[2] Voir plus loin, chapitre IV, Théorie de Homer Lane.

[3] On sait que le noir de fumée répond à peu près aux condi-

est la seule qui soit accessible à nos moyens d'étude, au moins pour le présent et peut-être d'une manière absolue. Rivés à la terre, ou du moins à son atmosphère, nous ne connaissons la chaleur solaire que de loin, et des définitions analogues à la précédente sont aussi inévitables, en ce qui touche les actions électriques ou magnétiques du Soleil, qu'en ce qui concerne son rayonnement.

M. *Violle*, à l'aide de l'actinomètre inventé par lui, arrivait à une température de 1500°, tout en déclarant probable une de 3000°. Mais bientôt le professeur italien *Rosetti*[1] faisait éclater à tous les yeux l'inexactitude des lois de *Newton* et de *Dulong* et *Petit*, en les appliquant à la recherche de la température du chalumeau oxyhydrique, — qui est à peu près de 2800°. — La loi de Newton donne 45000°, celle de Dulong et Petit 870°, alors que *Rosetti*, par une troisième formule empirique, obtenait pour le Soleil 20380°.

6. **La loi de Stefan.** — Seule la loi découverte par M. *Stefan*, de Vienne, en 1879, devait permettre d'arriver à des résultats concordants, car c'est la seule qui ne repose pas uniquement sur des résultats expérimentaux forcément limités dans les températures élevées[2]. *Boltzmann* a, en effet, donné sa démonstration

tions théoriques du corps noir. Mais il faut des appareils relativement compliqués, suggérés par les travaux de Kirchhoff et de construction toute moderne, si l'on veut reproduire avec rigueur le corps noir théorique (voir par exemple, sur cette question importante, *Rapports du Congrès international de physique de 1900*, t. II, p. 23).

[1] *Phil. Mag.*, vol. VIII, 1879, p. 324.

[2] On comprend l'importance capitale de ce point; toute expé-

théorique rigoureuse par la thermodynamique [1], et son exactitude n'est plus aujourd'hui mise en doute par personne. La loi de *Stefan* est ainsi conçue : *Le rayonnement intégral d'un corps absolument noir est proportionnel à la quatrième puissance de sa température absolue.* Elle suppose un rayonnement purement calorifique et non d'origine chimique ou électrique.

Par rayonnement intégral, on entend la quantité totale d'énergie de toute longueur d'onde envoyée par unité de temps sur l'unité de surface. On a donc [2] :

$$R = \sigma T^4$$

R étant le rayonnement intégral, T la température absolue du corps chaud et σ un coefficient constant. Ce coefficient varie un peu avec les expérimentateurs; la valeur admise actuellement par *Kurlbaum* et par *Poynting* [3], entre autres, est :

$$\sigma = 5{,}32\ 10^{-5}\ \text{ergs}$$

par unité de surface du corps rayonnant.

Si l'on introduit dans le premier membre de la formule ci-dessus la valeur de la constante solaire, en tenant compte de l'absorption atmosphérique pour plus d'exactitude, on obtient la valeur correspondante de T.

Le calcul se fait comme suit :

rience est impossible à la température solaire, et l'on ne peut procéder que par extrapolation. Extrapoler une formule physique théoriquement juste est déjà hasardeux; mais appliquer ce procédé à une loi empirique n'offre plus aucune garantie.

[1] *Wiedemanns Annalen,* Bd XXII, p. 291, et Scheiner, *Strahlung und Temperatur der Sonne,* p. 27.

[2] *Sitzungsberichte Wien.,* Bd LXXIX, II, p. 391.

[3] Kurlbaum, *Wied. Ann.,* vol. LXV, 1898. — J.-H. Poynting, *Phil. Trans.,* vol. CCII, A. 1904.

Admettons, par exemple, le chiffre de *Langley* pour la constante solaire corrigée de l'absorption terrestre, soit 3^{cal} : il équivaut à $0{,}21\ 10^7$ ergs par seconde. Soient R le rayon du Soleil, r la distance du Soleil à la terre, on a l'équation :

$$4\pi r^2 \times 0{,}21 \cdot 10^7 = 5{,}32\ 10^{-5} \times 4\pi R^2 \times T^4$$

ou :

$$T^4 = 10^{12} \left(\frac{r}{R}\right)^2 \frac{0{,}21}{5{,}32}.$$

En remplaçant R et r par leurs valeurs, on trouve environ *6500° absolus*[1].

Les calculs de *Stefan*, basés sur les mesures de *Violle*, ont donné 6000° C, tandis que M. *Le Chatelier*, à la suite d'observations inspirées par une méthode différente, obtenait 7600°.

7. **Recherches ultérieures sur la température solaire.** — Nous ne ferons que mentionner les recherches de *Zöllner* et de *G. A. Hirn*[2]. Ces savants partaient d'une méthode opposée à la précédente : en s'appuyant sur les lois connues (ou supposées connues) des gaz, ils admettaient que les protubérances solaires proviennent d'une compression violente des gaz chromosphériques. Ils cherchaient alors à en déduire leur température minima, et arrivaient ainsi à des chiffres compris entre 27000° et 100000° C. Mais leur méthode ne pouvait guère donner de bons résultats, même approximatifs : nous ne connaissons rien, en effet, des pro-

[1] On a cru récemment (*Féry, C. R.*, t. CXLVIII, 1909, p. 915), que la constante σ de Kurlbaum était trop faible. D'après les dernières expériences de MM. *Bauer* et *Moulin* (*C. R.*, t. CL, 1910, p. 167), l'écart serait cependant bien petit.

[2] *L'Astronomie*, sept. 1884, p. 334.

priétés réelles de la matière dans le Soleil, et nous ignorons même dans quelles conditions exactes se forment les protubérances.

8. — En 1893, une série d'expériences furent exécutées par MM. *W. E. Wilson* et *Gray* [1], avec le plus grand soin, en se servant du radiomètre de *Boys*, appareil thermoélectrique très sensible; l'on peut dire que c'est là le travail classique en fait de mesures directes de la température solaire. M. *W. E. Wilson* reprit, en 1902, les mesures déjà faites en y ajoutant quelques perfectionnements. Il obtint (en degrés absolus) :

5573° pour la température effective corrigée de l'absorption atmosphérique terrestre, en admettant les chiffres de *Rosetti*;

6201° pour la même température corrigée en outre de l'absorption par l'atmosphère solaire.

9. **Absorption par l'atmosphère solaire.** — Il est à remarquer que, en dehors de la correction qu'elle doit subir du fait de l'absorption par l'atmosphère terrestre, — correction dont nous reparlerons, — la radiation solaire éprouve une diminution sélective certaine en raison de son passage à travers l'atmosphère du Soleil lui-même. Le Soleil est, en effet, moins brillant près des bords, ce qui se voit aisément à la lunette du premier coup. Or si l'éclat de sa surface est uniforme, comme cela est probable, il doit nous paraître uniformément lumineux [2], ainsi qu'il est facile de s'en rendre compte d'après la loi du cosinus.

[1] *Phil. Trans.*, vol. CLXXXV, p. 361.

[2] Tout comme un globe de lampe ou une boule rougie au feu.

L'épaisseur plus grande traversée vient sans doute réduire l'éclat du bord. Malheureusement on ne peut évaluer en chiffres absolus cette influence : on n'a guère que des mesures d'éclats relatifs au centre et aux bords.

Le *P. Secchi*, en 1870[1], étudia le premier l'absorption solaire, et il trouva qu'elle atteignait au moins $\frac{88}{100}$ de la valeur totale de la radiation; mais il signala le fait que toutes les longueurs d'onde ne sont pas également absorbées.

Des recherches spectroscopiques s'imposaient donc. Elles furent faites en 1877 par *H. C. Vogel* qui, à l'aide d'un photomètre à polarisation et en prenant pour unité, pour toutes les radiations, l'éclat central, arriva aux résultats suivants :

Au bord du disque 13 o/o des rayons violets nous parviennent, 16 o/o des rayons bleus et verts, 25 o/o des rayons jaunes et 30 o/o des rayons rouges. A moitié chemin entre le centre et les bords, 88,7 o/o de la lumière violette et 96,7 o/o de la lumière rouge traversent l'enveloppe absorbante. Au centre et par définition, quelle que soit la couleur, on admet 100 o/o.

Ces résultats furent étendus aux rayons de très grande longueur d'onde, et des expériences détaillées faites à Potsdam, en 1892[3], montrèrent que le rayonnement calorifique du Soleil serait multiplié par 1,7 au moins si le soleil n'avait pas d'atmosphère.

Les observations les plus modernes, et qui constituent

[1] *Le Soleil*, 1re édition, p. 136.
[2] *Berliner Berichte*, 1877, p. 104, et Young, *le Soleil*, p. 200.
[3] *Astr. Nachr.*, nos 3105-3106.

peut-être ce que nous avons de plus net sur le sujet, sont celles d'*Abbott*. Ces recherches[1], effectuées par la méthode spectrobolométrique, ont donné, comme celles de Vogel, les éclats de la surface pour les différents λ et à diverses distances du centre, l'intensité centrale étant prise pour unité.

On doit cependant faire remarquer que ce qui précède ne modifie pas la définition de la constante solaire, à moins qu'on ne mentionne expressément que cette correction a été faite; on ne corrige habituellement les chiffres que de l'absorption terrestre.

10. **Travaux de Langley.** — Nous en arrivons aux mémorables travaux de *Langley* sur la distribution de l'énergie dans le spectre solaire et sur l'absorption sélective de notre atmosphère. Bien que le détail de ces recherches ne rentre pas dans notre cadre, les progrès qu'elles ont amenés dans la connaissance de la radiation du Soleil et de sa température nous obligent à en dire quelques mots. Leur grand mérite vient surtout de la sensibilité extrême de l'appareil thermométrique inventé par *Langley* en 1880 : le bolomètre.

Cet appareil est fondé sur la variabilité de la résistance électrique d'un fil de platine extrêmement fin, résistance qui est fonction de la température. En promenant le fil de platine le long d'un spectre solaire et en observant les déviations correspondantes d'un galvanomètre, on peut suivre la répartition de l'énergie calorifique, — c'est-à-dire « de l'énergie » tout court,

[1] *Ann. of the Astroph. Observatory, Smithson Instit.*, Washington, 1908.

— dans le spectre. La perfection [1] de l'appareil est prodigieuse ; elle dépasse de beaucoup celle connue jusqu'à ce jour : des différences de 1/10000000e de degré centigrade peuvent, par son emploi, être rendues perceptibles.

Comme les spectres prismatiques sont beaucoup plus « chauds », à dispersion égale, que ceux obtenus par

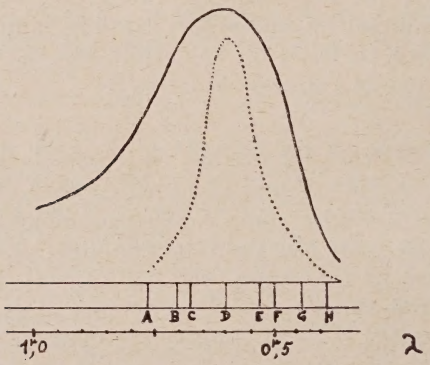


Fig 27. — Répartition de l'énergie solaire en fonction de la longueur d'onde (trait plein). La couche pointillée donne approximativement l'intensité lumineuse.

les réseaux (dix fois peut-être), c'est aux premiers que s'adressa d'abord le savant physicien américain lorsqu'il se proposa d'étudier la variation de l'énergie dans le spectre avec la longueur d'onde. Le maximum d'énergie est situé dans l'infra-rouge, au voisinage de 1$^{\mu}$. Mais on sait que, par son passage à travers un prisme, la partie peu réfrangible d'un spectre se trouve resserrée tandis

[1] *American Journal of Sc.*, vol. V, p. 245, 1898.

que les rayons ultra-violets sont plus fortement dispersés. Ce phénomène ne fausse pas seulement, dans la courbe à tracer, l'échelle des abscisses; mais il tend à déplacer le maximum du côté de l'infra-rouge. Grâce à la sensibilité du bolomètre, Langley put étudier le spectre des réseaux et reconnaître que le maximum véritable dans le spectre normal tombe tout près de la raie D ($0^{\mu},589$), ainsi que l'on devait s'y attendre un peu[1], puisque c'est la partie la plus lumineuse du spectre.

11. — Restait encore l'absorption atmosphérique, variable évidemment avec la longueur d'onde. Dans ce but Langley exécuta, à partir de 1881, une longue série d'expériences comparatives au mont Whitney, dans la Sierra Nevada, à plus de 4500 mètres d'altitude, puis au pied de la montagne. La pureté de l'air et le choix particulièrement heureux de cette station lui permirent de pousser jusqu'à λ 53000 ses études sur le spectre infra-rouge, et de construire la courbe indiquant les variations d'absorption atmosphérique en fonction de λ. Il put ainsi obtenir approximativement la véritable loi de variation de l'énergie solaire dans tout le spectre et constata que, par suite de l'absorption plus grande des rayons très réfrangibles, le maximum d'intensité se trouve encore déplacé vers le bleu et devient

[1] Il ne faudrait pas croire cependant que ce résultat doive nécessairement être une conséquence de l'identité bien connue entre les radiations lumineuses, calorifiques et chimiques; on sait en effet peu de choses sur la sensibilité de l'œil aux diverses longueurs d'onde *à énergie égale*, cependant il n'y a guère lieu de craindre de graves anomalies.

voisin de $0^{\mu},5$ [1]. Comme l'atmosphère propre du Soleil vient encore augmenter cet effet, il en résulte, chose singulière, que le Soleil, vu en dehors de notre atmosphère, aurait une teinte nettement bleue [2] au lieu de celle blanc jaune que nous lui voyons.

12. **Application de la loi de Wien.** — La conclusion des recherches qui précèdent a une importance particulière à propos de la température effective du Soleil. C'est de nous permettre d'utiliser une autre loi de rayonnement des corps noirs, la loi de *Wien* [3]. Ainsi que la loi de Stefan, cette proposition, démontrée en 1901 par un raisonnement théorique rigoureux, peut être considérée comme une loi naturelle au même titre que celles de Mariotte ou de Képler. Nous ne voulons pas dire que l'expérience ne révèle pas quelques écarts insignifiants ; on peut du moins tenir la loi pour strictement vérifiée, quitte à chercher ensuite l'explication des résidus trouvés. La loi de Wien s'énonce ainsi : La longueur d'onde qui correspond au maximum énergétique de l'émission d'un corps noir est en raison inverse de sa température absolue.

Si λ_m est cette longueur d'onde, on a :

$$\lambda_m \theta = C^{te} = 2940 \text{ [4]}.$$

Il suffit donc, pour connaître la température effective

[1] Langley (S. P.), *Researches on Solar Heat, a reprint of the Mount Whitney expedition,* Washington 1884, pl. XV. Voir aussi *Journal de Physique,* 1887 (article de Michelson).

[2] *Nature,* vol. XXVI, p. 589.

[3] Voir pour tout ce qui concerne la loi de Wien O. D. Chwolson, *Traité de physique,* trad. Davaux, t. II, fasc. 1, p. 73.

[4] λ_m étant exprimé en microns et θ en degrés absolus, 2940 est la constante trouvée par *Lummer* et *Pringsheim* (1899).

d'un corps, de savoir dans quel région du spectre il nous envoie le plus d'énergie. On trouve ainsi, pour le Soleil, 5880° absolus. L'accord avec les autres déterminations est satisfaisant, surtout si l'on songe à la grande difficulté et partant à l'incertitude relative du travail de Langley. Le point maximum de cette courbe ne peut, en tout état de cause, se déterminer qu'avec une faible approximation. Il est d'ailleurs évident que, pour une détermination un peu précise de ce qu'on est convenu d'appeler la température effective[1] du Soleil, la loi de Stefan, par sa forme même, est beaucoup plus favorable. D'un autre côté, pour les corps non absolument noirs, λ_m varie dans de larges limites. On s'attache donc de plus en plus à la mesure de la constante solaire et à ne considérer la méthode précédente que comme une vérification précieuse.

13. **Mesures récentes de la constante solaire et de l'absorption atmosphérique terrestre.** — Il est cependant très probable que la « constante solaire » n'a pas une fixité absolue. L'absorption atmosphérique varie, en tout cas, d'une façon incessante, — on le voit chaque jour; — de plus, le pouvoir absorbant de l'atmosphère solaire est très probablement

[1] La loi de Wien ne détermine pas, strictement parlant, la « température effective » du Soleil, mais plutôt celle d'un corps noir placé à la distance du Soleil et pour lequel la répartition de l'énergie en fonction de la longueur d'onde coïnciderait sensiblement avec la courbe observée dans le voisinage du maximum. Il y a lieu de croire cependant que ces deux définitions coïncident dans le cas du Soleil, l'aspect des courbes et l'accord des résultats le prouvent. On peut donc en conclure que le Soleil rayonne sensiblement à la manière d'un corps noir, ce qui justifie l'introduction de la « température effective ».

variable, ainsi que la quantité de chaleur émise initialement par la photosphère : ces derniers faits sont rendus presque certains par la présence des taches, facules, etc. Il serait chimérique de chercher à dégager actuellement l'influence de toutes ces causes de fluctuations; on doit déjà se tenir pour satisfait de pouvoir mesurer la valeur de la radiation solaire un jour déterminé, en se bornant à l'étude du Soleil de ce jour-là. D'ailleurs, toutes les causes d'erreurs connues tendent malheureusement à diminuer le chiffre final, ce qui ne favorise guère une détermination précise.

14. — Tous les essais de mesure de la constante solaire reposent ainsi sur une extrapolation; on détermine la quantité de chaleur reçue par l'actinomètre pour différentes hauteurs du Soleil au-dessus de l'horizon : à l'aide d'un calcul géométrique facile, mais inexact, on exprime cette quantité en fraction de l'épaisseur des couches d'air traversées, et par une formule plus ou moins empirique on obtient la valeur de la constante si l'atmosphère terrestre n'existait pas.

La plupart des actinomètres sont construits pour mesurer l'échauffement d'un corps noir, de masse et de capacité calorifique connues, quand les rayons du Soleil le frappent pendant un temps donné sur une certaine portion de sa surface. On tient compte, par un artifice quelconque, de la perte par rayonnement durant l'exposition. La méthode précédente est bien supérieure à celle employée autrefois, et qui consistait à attendre que le corps actinométrique se mît de lui-même en équilibre thermique avec l'espace environnant, tout en restant exposé aux rayons solaires. Le corps actinomé-

trique agissait à la manière d'un volant dans une machine, et en égalisant les fluctuations du rayonnement faisait disparaître les maxima, seuls intéressants[1].

L'influence des conditions atmosphériques favorables est très grande. Si l'on peut en effet, par une loi trigonométrique simple, se rendre compte de l'épaisseur des couches traversées et en calculer grossièrement l'absorption[2], il est impossible d'éliminer les pertes par diffusion sur les particules solides en suspension dans l'air.

La variation inconnue de l'absorption avec l'altitude est encore, de toutes ces causes d'erreur, la plus grave; elle ne peut être atténuée qu'en observant à des altitudes aussi élevées que possible. Les particules solides se trouvant surtout dans les régions basses, on peut alors négliger l'influence de la diffusion; celle-ci, qui varie en raison inverse de la quatrième puissance de la longueur d'onde, est surtout sensible pour les rayons violets, qui sont précisément ceux auxquels correspond l'énergie la plus faible.

De plus, il est fort rare de rencontrer des circonstances atmosphériques favorables, c'est-à-dire un ciel parfaitement pur et d'un bleu profond. On constate

[1] Ceci est vrai surtout quand on emploie des appareils enregistreurs étalonnés par comparaison avec les actinomètres absolus. Les dépressions de la courbe sont alors des accidents analogues à ceux qui seraient dus au passage de petits nuages devant le Soleil, et par suite sans valeur. Il en est de même avec les instruments non automatiques dès que le nombre des pointés est un peu grand.

[2] En employant une formule de la forme $I = I_0 e^{-\lambda x}$, par exemple. I_0 étant l'intensité avant l'entrée dans l'atmosphère, I l'intensité observée, λ le coefficient d'absorption, x l'épaisseur de la couche ($e = 2{,}71828...$).

alors que, dans ces conditions, la valeur trouvée de la constante solaire est toujours relativement élevée.

15. — Les résultats obtenus ont été les suivants :

Forbes, en 1842, à la suite d'observations faites au sommet du Faulhorn[1], obtint 2c,85, mais on était alors sous l'influence du résultat de *Pouillet* (1c,76), et on n'attribua pas à ce chiffre toute la valeur qu'il méritait. *Violle* trouva plus tard 2c,54[2], tandis que *Crova*, à Montpellier, obtint des nombres variant entre 1c,8 et 2c,7[3] : les nombres les plus forts coïncidant toujours avec les meilleures conditions atmosphériques et la symétrie la plus approchée de la courbe horaire.

Les travaux de *Langley*, exécutés pendant l'expédition du mont Whitney, lui donnèrent à penser que l'absorption atmosphérique terrestre était au moins deux fois plus forte qu'on le supposait avant lui. C'est à peine s'il retrouva à la surface 60 %[4] des radiations qui frappent normalement une atmosphère parfaitement pure ; la valeur de la constante solaire qui résulta de cette constatation s'en trouva notablement relevée et atteignit 3 calories. M. *Savelieff*[5], en employant l'appareil et la méthode de *Crova*, obtint à Kieff en 1889 2c,81 et 3c,47. Un peu plus tard (1897) *Hansky*, au sommet du Mont-Blanc, trouvait 3c,0 et 3c,4.

[1] *Phil. Trans.*, vol. CXXXII, p. 273.

[2] *Ann. de chim. et de phys.*, t. X, p. 321.

[3] *Ann. de chim. et de phys.*, t. XI, p. 505. — Voir aussi le rapport de Crova sur la « constante solaire », *Rapports du Congrès de physique de 1900*, t. III.

[4] *Rosetti* admettait 78 % et *Wilson* et *Gray* 71 %.

[5] *C. R.*, t. CXII, p. 1200, et aussi article de Crova cité ci-dessus.

Ces chiffres semblaient présager de fortes valeurs de la constante solaire : ils ne furent cependant pas confirmés. *Rizzo* en 1898 et *Scheiner* en 1902 arrivèrent respectivement à 2°,5 et 2°,3. Les expériences de M. *Millochau*[1], au Mont-Blanc, lui ont donné des résultats de même ordre, combinés avec ceux de l'appareil électrique inventé par M. Féry pour la mesure industrielle de la température des fours. Enfin *Knut Angström*[2], avec son classique pyrhéliomètre à compensation, est arrivé à 2°,17, moyenne de nombreux pointés.

On voit donc que les observations récentes tendent plutôt à faire osciller la constante solaire entre 2° et 2°,5. Les belles recherches d'*Abbott*[3], publiées dernièrement sont venues confirmer cette impression : les expériences de Langley, reprises et perfectionnées par ce savant et ses collaborateurs, ont, en effet, donné pour constante solaire 2°,1 soit un nombre très voisin de celui d'Angström.

16. **Conclusion**. — En résumé, l'on peut remarquer que la loi de *Stefan* fournit toujours, par suite de sa forme algébrique, malgré des valeurs assez dissemblables de la constante solaire, des valeurs voisines pour la température effective, — au moins quand on ne compare que des chiffres obtenus dans des conditions identiques. — Les résultats les plus probables

[1] *Bulletin de la Soc. de phys.*, 1907, fasc. 1. — Voir pour les remarques auxquelles a donné lieu cette méthode : Deslandres, *Comptes rendus de la Société de physique*, janvier 1909.

[2] *Nova Acta Regiæ Soc.*, etc., sér. IV, vol. I, n° 7, Upsal, 1908.

[3] Voir travail cité p. 126 de ce volume.

sont peut-être, pour conclure, ceux qui donnent à la constante solaire une valeur voisine de 2c,3 d'où l'on déduit pour la température effective (sans tenir compte de l'absorption par l'atmosphère solaire), 6000° abs. environ.

Mais il faut remarquer que les corps noirs, à température égale, rayonnent plus de chaleur que les autres ; la température effective correspondant à un rayonnement donné ne saurait indiquer qu'un minimum nécessaire pour produire ce rayonnement. De plus, le Soleil est loin de réunir les conditions que l'on s'attendrait à trouver chez un corps noir, au sens de la physique moderne ; ceux réalisés jusqu'ici dans les laboratoires sont, en effet, des enceintes creuses ne rayonnant que par un trou très petit ; au contraire, la radiation solaire s'effectue dans toutes les directions et par la surface extérieure de l'astre. Il serait donc peu raisonnable de faire une assimilation tant soit peu étroite et de croire que la température de la photosphère est trop voisine de la température effective.

Tout bien pesé, en définitive, il semble que la température véritable de la surface photosphérique doive être comprise entre 6000 et 12000°, les vraisemblances étant pour 7 ou 8000°.

LE PROBLÈME DE L'ENTRETIEN DE LA CHALEUR SOLAIRE

1. **Énormité du rayonnement.** — Il n'est pas besoin de connaître d'une façon tant soit peu précise la température du Soleil, pour se rendre compte que la quantité de chaleur rayonnée par lui depuis l'origine

a dû être énorme; le seul fait que l'on ait pu, en concentrant les rayons solaires au foyer d'une puissante lentille, fondre et volatiliser les corps les moins fusibles, suffit à donner une idée de l'intensité d'un pareil rayonnement.

Les mesures modernes de la constante solaire permettent d'ailleurs de faire, à ce propos, des calculs qui, pour être grossiers, n'en sont pas moins fort instructifs.

Parmi toutes les valeurs de la constante solaire, choisissons celle de *Pouillet*. Nous savons aujourd'hui que ce chiffre, — $1^{cal},763$ par centimètre carré et par minute, — est sûrement trop faible; nous serons donc certains d'être au-dessous de la vérité.

On trouve aisément que le Soleil émet, par mètre carré de sa surface, 816710 grandes calories par minute, ce qui fait pour la surface entière et par an :

$$2,6 \quad 10^{30} \text{ grandes calories.}$$

Comme la masse du Soleil est de l'ordre de

$$1,9 \quad 10^{30} \text{ kilogrammes,}$$

chaque kilogramme émet par an 1,36 calorie.

Si donc l'on compare le Soleil à un corps chaud qui se refroidit et si l'on admet que sa chaleur spécifique moyenne est à peu près égale à l'unité (ou plutôt de cet ordre de grandeur), la perte de température serait annuellement représentée par le même chiffre, soit $1°,36$.

Or la composition du Soleil, d'après ce que l'analyse spectrale nous en a révélé, ne semble pas fort différente de celle des autres corps célestes, et en particulier on y rencontre un grand nombre d'éléments ter-

restres : le fer, le manganèse, le sodium, l'hydrogène, le magnésium, etc. L'eau étant, de tous les corps connus, celui qui a la plus grande chaleur spécifique, la chaleur spécifique moyenne du Soleil doit donc être plutôt inférieure à l'unité. Le chiffre précédent 1°,4 est partant plutôt trop faible : l'emploi d'une autre constante solaire que celle de Pouillet tendrait à l'accroître, de sorte que nous pouvons le considérer comme un minimum.

2. **Nécessité d'un renouvellement continuel.** — Il ne semble pas que depuis les temps historiques, — depuis le temps des Égyptiens par exemple, — le rayonnement solaire ait beaucoup varié. Tout au plus pourrait-on dire qu'aux temps préhistoriques ses variations, relativement faibles d'ailleurs, ont pu donner naissance aux changements climatériques constatés par la géologie (périodes glaciaire et carbonifère). Mais la chose est loin d'être démontrée et, en tout cas, fort antérieure à la période historique.

Or, depuis cinq mille ans, si l'on admet la perte de température que nous venons de trouver, le Soleil aurait dû se refroidir de 6500° environ, *au moins*. C'est là un chiffre inadmissible : il est à très peu près égal à celui que les mesures modernes les plus dignes de foi conduisent à admettre pour la température effective du Soleil.

Nous en arrivons donc nécessairement à cette conclusion que l'hypothèse faite au début de notre calcul est inexacte : le Soleil ne saurait être comparé à un corps chaud qui se refroidit. La provision de chaleur se renouvelle continuellement au fur et à mesure

qu'elle s'épuise. Comment se renouvelle-t-elle ? C'est justement là le problème qui se pose à présent.

3. **Hypothèse de la combustion.** — Nous ne pouvons croire que la réponse soit dans une combustion pure et simple. Pour entretenir son prodigieux dégagement de chaleur il faudrait, d'après le calcul de *Young*[1], que le Soleil brûle par heure une couche d'anthracite de sept mètres de haut répandue sur toute sa surface. A ce régime-là, si le Soleil était tout entier en charbon, il ne durerait pas cinq mille ans. *Sir W. Thomson*[2] fait un calcul analogue en partant de données du même ordre avec le coton-poudre. Il trouve qu'un Soleil entièrement fait de cette substance, brûlant sans déflagrer, ne durerait pas huit mille ans. En supposant le Soleil formé exclusivement de deux des corps qui, par leur combustion, dégagent le plus de chaleur, le silicium et l'oxygène, *Faye* n'était arrivé qu'à deux mille ans, avec des données un peu différentes il est vrai; mais les résultats sont du même ordre. Tout cela prouve surabondamment que notre hypothèse est à rejeter et qu'il faut chercher autre chose.

4. **Hypothèse météoritique de Mayer.** — La thermodynamique semble indiquée pour fournir à la question posée une solution satisfaisante. Nous ne faisons que mentionner l'idée d'après laquelle la rotation du Soleil sur lui-même, par frottement sur le milieu environnant, compenserait les pertes dues au rayonne-

[1] C.-A. Young, *General Astronomy*. Ginn and C°, Londres, éd. 1904, p. 239.

[2] Sir W. Thomson, *Conférences scientifiques et Allocutions*, trad. P. Lugol. Gauthier-Villars, Paris, 1893, p. 237.

ment. Cette supposition ne résiste pas à l'examen : on ne voit pas pourquoi elle ne s'appliquerait pas aux planètes, et elle supposerait de toute façon, autour du Soleil, l'existence d'un nuage cosmique beaucoup trop dense pour être compatible avec les résultats de la mécanique céleste.

5. — Le fondateur même de la thermodynamique, l'Allemand *R. Mayer*[1], a lancé une hypothèse plus acceptable : le rayonnement solaire serait entretenu par la chute incessante sur le Soleil d'une pluie de matière météorique : aérolithes et étoiles filantes, dont la force vive se transformerait, par le choc, en chaleur.

Il est aisé de calculer la vitesse V qu'un corps solide de masse m venant de l'infini acquerrait en tombant sur le Soleil ; elle est d'ailleurs la même que celle qu'il faudrait imprimer à un mobile pour que, lancé hors du Soleil, il n'y retombe jamais. Le principe des forces vives donne immédiatement :

$$\frac{1}{2} m V^2 = f \frac{mM}{r},$$

en appelant r le rayon du Soleil, M sa masse, f la constante de la gravitation.

Portant dans cette équation les valeurs connues des lettres qui y entrent, on trouve :

$$V = \sqrt{\frac{2 \times 210^{33} \times 6{,}510^{-8}}{7\,10^{10}}} \text{ unités C.G.S.}$$

ou 610 *kilomètres par seconde*.

[1] *Beiträge zur Dynamik des Himmels*, p. 12, 1848. La théorie de Mayer a été surtout répandue en Angleterre par Waterston.

Il est donc facile de se rendre compte qu'un corps pesant 1 kilogramme, atteignant le Soleil avec cette vitesse, dégagerait quelque chose comme 45 000 000 de grandes calories, soit 6 000 fois plus que sa combustion ne saurait en produire, fût-il formé de carbone ou d'hydrogène solidifié brûlant dans l'oxygène.

On peut ainsi calculer la quantité de matière animée de cette vitesse qui, en tombant sur le Soleil, engendrerait assez de chaleur pour compenser exactement celle perdue dans le même temps par rayonnement, et l'on trouve, en employant les chiffres que nous avons cités, qu'il devrait tomber sur le Soleil $1^{kg},1$ de matière par mètre carré et par heure[1]. L'augmentation qui en résulterait dans le diamètre solaire aurait pu passer inaperçue au cours des âges; il faudrait trente-cinq mille ans pour qu'elle atteigne $1''$; or la précision des observations *actuelles* du diamètre solaire est à peine supérieure à ce chiffre.

On doit aussi remarquer que la terre reçoit constamment le choc d'aérolithes ou de météores d'origine cosmique; il n'y a donc rien d'anormal à supposer que le Soleil, dont l'intensité attractive est beaucoup plus forte, sert de cible à un bombardement bien plus sensible.

6. **Impossibilité d'une chute continue d'astéroïdes.** — Malheureusement, s'il est indiscutable qu'une partie de la chaleur solaire tire de là son origine, de graves objections s'opposent à ce qu'il en soit

[1] Cela fait $^1/_{35\,000\,000}$ de la masse solaire par an; *lord Kelvin* admet $^1/_{15\,000\,000}$, probablement en partant d'une constante solaire plus forte.

ainsi pour une fraction importante ; c'est tout au plus si l'on peut attribuer à une source météorique le centième du rayonnement total.

En premier lieu, l'augmentation qui se produirait, de toute nécessité, dans la masse du Soleil, serait inadmissible ; elle devrait être telle qu'en deux mille ans celle-ci se serait accrue de $\frac{1}{15\,000}$ environ de sa valeur, ce qui aurait, une fois les deux mille ans écoulés, retardé de $\frac{1}{8^e}$ d'année le mouvement orbital de la terre[1] ; les observations, il est à peine besoin de le dire, n'ont rien montré de pareil.

[1] On a en effet avec les notations déjà employées :

$$\frac{1}{2}v^2 - \frac{fm}{r} = -\frac{fm}{2a}$$

d'après le principe des forces vives et :

$$a^3n^2 = fm$$

d'après la 3e loi de Képler (n = moyen mouvement).

La position et la vitesse de la planète, considérées ici comme données, ne sont pas influencées par l'accroissement de la masse centrale ; on en déduit, de la 1re équation :

$$-\frac{fdm}{r} = -\frac{fdm}{2a} + \frac{fmda}{2a^2}, \quad \text{ou} \quad \frac{da}{a} = -\frac{dm}{m};$$

car $a = r$ à peu de chose près. D'après la 2e équation :

$$\frac{3da}{a} + \frac{2dn}{n} = \frac{dm}{m}, \quad \frac{dn}{n} = \frac{2dm}{m} = Sdt, \text{ ou encore } n = n_0e^{st}.$$

Si $\frac{dm}{m} = \frac{1}{35\,000\,000}$ par an, on aura : $n = n_0\left(1 + \frac{2}{35\,000\,000}t\right)$, et dans la longitude moyenne de la terre apparaîtra un terme en $\frac{1}{2}St^2$ qui, au bout de 2000 ans, sera égal à

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{2}{35\,000\,000} \times 4\,000\,000 = \frac{1}{8{,}7} \text{ année.}$$

7. — D'ailleurs, de toute façon, on ne saurait échapper à cette conclusion[1], car parmi tous les météores qui pourraient venir des espaces intersidéraux, très peu viendraient frapper le Soleil ; les autres se contenteraient de graviter autour de lui sans le toucher, à la manière des planètes et des comètes.

Il faudrait donc admettre dans le voisinage du Soleil l'existence d'un anneau de matière cosmique comparable à la lumière zodiacale et d'une masse considérable. Cet anneau produirait, comme un raisonnement assez simple de mécanique céleste le montre, un mouvement direct des périhélies de Mercure et de Vénus, et aussi un mouvement en sens contraire de leurs nœuds ; or l'observation n'a révélé, comme inexplicables par les perturbations prévues, qu'un mouvement du périhélie de Mercure et un du nœud de Vénus. En ce qui regarde ces deux irrégularités, *Newcomb* a calculé[2] qu'un anneau d'astéroïdes situé entre Mercure et Vénus, et incliné sur le plan de ces deux orbites, rendrait bien compte des apparences à la condition d'avoir pour masse $\frac{1}{37\,000\,000}$ de celle du Soleil. Il estime d'ailleurs que cet anneau se verrait s'il existait. On voit combien nous sommes loin des chiffres qu'il nous faudrait, si la théorie de *Mayer* était exacte. Pour alimenter le Soleil pendant trois mille ans encore,

[1] Il est vrai que Mayer admettait que le Soleil perd constamment de la matière, ainsi que cela aurait lieu si la théorie de l'émission en optique était vraie. De la sorte il pourrait y avoir compensation ; mais il est inutile d'insister sur ce que l'hypothèse a de gratuit.

[2] F. Tisserand, *Mécanique céleste*, t. IV, p. 539.

— et, sans présomption, nous pouvons espérer qu'il durera bien davantage, — il faudrait que l'anneau en question ait une masse comparable au $\frac{1}{5\,000}$ de celle du Soleil, de l'ordre de la masse de Saturne.

Enfin le professeur *Peirce* a démontré que si la chaleur solaire était due à des météorites, la terre devrait recevoir de celles qui frappent sa surface moitié autant de chaleur qu'elle en reçoit du dehors. *Young*[1] a fait le calcul : il en faudrait pour cela dix millions de fois[2] plus que nous n'en recevons réellement.

Ainsi donc, de toute façon, la théorie de Mayer est inadmissible, en tant qu'explication de la constance du rayonnement solaire. Il en va tout autrement s'il s'agit de l'origine même de la chaleur solaire : elle mérite alors d'être prise en sérieuse considération, mais nous reviendrons sur ce sujet[3].

THÉORIE DE HELMHOLTZ

1. **Principe.** — L'hypothèse de *Laplace*, qui exige la condensation progressive de la nébuleuse originelle, contenait en elle-même une explication du mystère. La condensation, en se poursuivant chez le plus important des corps célestes qui subsistent, compenserait par le dégagement de chaleur consécutif les pertes

[1] Young, *General Astronomy*, p. 243.

[2] Voir aussi Newcomb, *Popular Astronomy*, 2e édit., p. 521, et un article de M. Williams dans *Nature*; vol. III, 1870, p. 26.

[3] Voir p. 152.

dues à la radiation[1]. Quand, en effet, un corps tombe graduellement pendant un certain temps à travers un milieu qui lui oppose une résistance et finit par l'arrêter, le frottement dégage autant de chaleur que si le corps, en chute libre dans le vide, avait été arrêté instantanément. Si donc le Soleil se contracte, la quantité de chaleur produite par ce phénomène doit être énorme, la force attractive de la surface solaire étant vingt-sept fois plus grande que la gravité terrestre, et la masse en travail étant elle-même considérable.

2. — Au cours du phénomène, chaque particule de la surface se rapproche du centre d'une quantité égale à la diminution éprouvée par le rayon solaire; les éléments de volume des couches plus profondes subissent de moindres déplacements et sont soumis à une attraction plus faible. Mais toutes les particules de la masse entière, à l'exception du centre, participent plus ou moins à la régénération de la chaleur de l'astre.

Helmholtz est le premier qui ait eu, en 1854, cette idée; mais elle a été adoptée et perfectionnée depuis par bien des savants, et l'on peut dire que c'est encore la plus généralement admise aujourd'hui : peut-être cependant les découvertes récentes de la physique seraient-elles de nature à la remettre partiellement en discussion. M. *Maxwell Hall*[2] trouve qu'une contraction de 39 mètres par an suffirait à expliquer la constance approchée du rayonnement. L'énergie serait

[1] Cette lente contraction peut amener la liquéfaction et la solidification de certaines parties de la masse gazeuse : la chaleur ainsi produite vient s'ajouter à la précédente.

[2] *Monthly Notices*, 1874, p. 237.

alors simplement fournie par la diminution de l'énergie potentielle de gravitation. Celle-ci diminuant, l'énergie cinétique doit augmenter en vertu du principe de la conservation de l'énergie, et par suite la température (qui d'après la théorie cinétique des gaz lui est proportionnelle) tend à croître. Selon cet auteur, il faudrait 18 263 ans pour produire ainsi dans le diamètre solaire une variation de 1″ ; c'est là un résultat admissible.

3. **Conception de Sir William Thomson.** — *Sir W. Thomson*[1] qui, après avoir soutenu autrefois la théorie météorique, ne tarda pas à se ranger aux idées de Helmholtz, concevait les choses de la manière suivante :

Par suite de refroidissement superficiel, les masses fluides extérieures augmentent de densité et tendent à se rapprocher du centre, tandis que des portions plus chaudes viennent les remplacer; ces mouvements tendent à produire, comme on le verra, un équilibre convectif[2]. Si cet état d'équilibre pouvait se réaliser sans qu'il y ait refroidissement, — par exemple par agitation mécanique, — nous verrons que chaque point du globe solaire aurait par définition une densité et une température correspondant à sa position; dans ce cas, plus la densité est grande, plus la température l'est aussi, en vertu des lois de Laplace et de Gay-Lussac (car $t = t_1 \rho^{\gamma - 1}$). La gravitation est équilibrée : elle ne peut cesser de l'être que par un abaissement de

[1] *Conférences*, trad. P. Lugol (citées déjà), p. 238.
[2] Voir plus loin, chapitre IV.

température aux points de même densité. Cet abaissement de température, s'il se produit, permet alors à la gravitation de travailler : il y a dégagement de chaleur et le Soleil se réchauffe.

4. — Il est facile de se rendre compte que, si l'on suppose le Soleil à l'état gazeux, il doit nécessairement en être ainsi, pourvu que la faiblesse relative de sa chaleur spécifique, jointe à la grandeur de son coefficient de dilatation, lui permettent par un rayonnement superficiel donné de se contracter suffisamment (voir plus loin, page 150). Supposons en effet que la contraction, abstraction faite de son origine, ait réduit le Soleil de moitié. Si la température du Soleil est en moyenne restée la même, la pression aura, d'après la loi de Mariotte, varié en raison inverse du volume; elle sera devenue huit fois plus forte. Considérons maintenant l'action de la gravitation sur la couche superficielle, sans faire d'hypothèse sur la température : après la contraction, la gravitation est quatre fois plus forte pour cette couche, la surface a varié dans la même proportion; de sorte que la pression, pour qu'il y ait équilibre, doit être seize fois plus grande, et non huit fois comme dans le cas où la température reste constante. Si, par suite, le Soleil se condense de cette façon, sa température moyenne doit s'élever.

C'est parce que le Soleil devient moins chaud que sa masse peut céder graduellement à la tendance de la gravitation et se condenser, ce qui lui permet de récupérer en grande partie ses pertes de rayonnement.

5. — La remarque précédente montre comment on doit interpréter la forme, en apparence paradoxale, quelquefois donnée, à la théorie de Helmholtz[1], et d'après laquelle le Soleil, à force de se refroidir et de se condenser, doit finir par se réchauffer. Toute portion de la masse où la densité a une valeur déterminée, — par exemple la densité de notre atmosphère à l'état normal, — va se refroidissant de plus en plus; mais la profondeur à laquelle on peut trouver une densité déterminée diminue à mesure que la condensation s'accentue; de sorte qu'à des distances égales de la surface la température devient de plus en plus élevée avec le temps[2].

6. — Sir William Thomson trouve qu'une contraction de 35 mètres par an rendrait suffisamment compte des faits.

Cherchons à retrouver ce chiffre :

Supposons d'abord la densité du Soleil uniforme et proposons-nous de trouver le travail produit par une contraction régulière $\frac{dR}{dt}$, la même dans toute la masse. Chaque couche située à une distance r du centre est attirée par la masse qui lui est intérieure,

[1] Sir Robert Ball, *The Story of the Heavens*. Londres, Cassell, 3e édit., 1887, p. 502.

[2] Ceci n'est vrai, il ne faut pas l'oublier, que pour un corps entièrement gazeux : l'accroissement énorme de densité amené par la condensation (c'est probablement le cas du Soleil actuellement) finit par entraver les phénomènes thermodynamiques et par rapprocher l'astre du cas d'un corps solide. La compensation ne se fait plus : le refroidissement véritable commence, considérablement ralenti.

soit $\frac{4}{3}\pi r^3\rho$ (notations déjà employées). La force est donc :

$$\frac{f}{r^2}\times\frac{4}{3}\pi r^3\rho\times 4\pi r^2\rho dr.$$

Et le travail total par unité de temps sera :

$$\frac{d\mathrm{R}}{dt}\int_0^{\mathrm{R}}\frac{16}{3}\pi^2 f\rho^2 r^3 dr=\frac{4}{3}fx\pi^2\rho^2\mathrm{R}^4. \quad (1)$$

Calculons en unités C.G.S.

La chaleur dégagée par an, avec la constante de Pouillet, était $2{,}6\ 10^{33}$ petites calories ou $10{,}9\ 10^{40}$ ergs [Ce serait $21\ 10^{40}$ ergs avec la constante de Langley 3 calories] :

Et avec les chiffres connus on a l'équation

$$\frac{4}{3}.6{,}5\ 10^{-8}\times 1{,}4^2\times\frac{1}{16}(6{,}1\ 10^{22})^2 x=10{,}9\ 10^{40},$$

$$x=\frac{d\mathrm{R}}{dt}=28 \text{ mètres par an.}$$

Ce résultat correspond au cas où la condensation est uniforme à l'intérieur du Soleil. Il n'en est évidemment pas ainsi : les densités vont en croissant de la surface au centre. Thomson fait le calcul en supposant la contraction proportionnelle à la distance au centre; x est alors remplacé dans l'intégrale par $\frac{r}{\mathrm{R}}x$, ce qui conduit par intégration à un facteur $\frac{1}{\mathrm{R}}\frac{\mathrm{R}^5}{5}$ venant remplacer $\frac{\mathrm{R}^4}{4}$. En définitive, x est multiplié

par $\frac{5}{4}$, ce qui donne $\frac{5}{4} \times 28$, ou 35 mètres par an, comme valeur approchée de la contraction.

7. **Estimation de l'âge du Soleil et de sa durée à venir.** — On peut tirer de ce chiffre plusieurs conclusions intéressantes : notamment que le rayon du Soleil doit diminuer de $\frac{1}{20^e}$ de sa valeur, en 1 million d'années.

Si l'on remarque que, pour un laps de temps considérable, il faut tenir compte de la variation de densité et remplacer dans la formule ρ par $\frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3}$, M étant la masse invariable de l'astre, on voit que le calcul ci-dessus (1) donne $\frac{1}{R^2}\frac{dR}{dt}$, ou $\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{R}\right)$ plutôt que $\frac{dR}{dt}$. Il est donc plus exact de dire que l'inverse du rayon croît de $\frac{1}{20^e}$ de sa valeur par million d'années.

Ceci nous conduit à trouver que le Soleil était, il y a 15 millions d'années, quatre fois plus gros qu'à présent (en diamètre apparent), et que dans 20 millions d'années il sera diminué de moitié, en supposant bien entendu que le rayonnement ne varie pas sensiblement.

Il faut dire que la densité devrait, dans ce dernier cas, augmenter beaucoup : elle passerait de 1,4 à $1{,}4 \times 2^3$ ou 11,2, celle du plomb à peu de chose

près. La condensation ne pourrait plus dès lors se poursuivre dans ces conditions, elle serait sans doute gênée par l'agglomération des molécules. De plus, la surface du Soleil serait quatre fois moindre, et, par suite, la rapidité du rayonnement diminuerait dans de fortes proportions. C'est pourquoi *Newcomb* [1], par des raisonnements analogues à ceux exposés, en est arrivé à cette conclusion « qu'il est difficile de croire que le Soleil continue à fournir assez de chaleur pour entretenir la vie sur la Terre (au moins la vie telle que nous la connaissons actuellement), pendant 10 millions d'années encore ».

8. — La densité du Soleil doit croître cependant, quand on approche du centre, beaucoup plus que nous ne l'avons supposé. M. *Homer Lane* en arrive en effet à trouver, comme nous le verrons [2], que la densité au centre du Soleil surpasserait du tiers celle du platine métallique dans le cas des gaz diatomiques, et atteindrait celle du fer avec les gaz monoatomiques. La loi de variation de la densité est, à la vérité, inconnue; mais sa connaissance exacte ne saurait changer l'ordre de grandeur des résultats obtenus.

9. — D'autre part, nous sommes partis dans nos calculs, avec Sir W. Thomson, de la constante solaire de Pouillet. Les déterminations plus modernes conduiraient à diviser les durées en années par 1,3 environ. En tenant compte de cette remarque, lord Kelvin abou-

[1] *Newcomb* trouve un laps de temps notablement plus faible avant que le Soleil diminue de moitié, en employant évidemment des données et des hypothèses différentes.

[2] Voir chapitre IV, p. 193.

tit à l'opinion suivante : « Il serait excessivement téméraire d'admettre comme probable que la lumière du Soleil ait brillé pendant plus de 20 millions d'années dans le passé de l'histoire de la Terre, ou de compter sur plus de 5 à 6 millions dans l'avenir[1]. »

AUTRES CALCULS DE SIR W. THOMSON

10. **Estimation de la « chaleur spécifique moyenne ».** — Le chiffre de 1°,4, que nous avons obtenu au début comme valeur de la perte annuelle de température du Soleil, est, nous l'avons vu, sûrement faux. *Sir W. Thomson* s'est proposé, par une marche inverse, de trouver entre quelles limites admissibles le refroidissement doit se maintenir, si l'on admet la théorie de Helmholtz. Il est évident que cela revient, dans un certain sens, à trouver les limites de la chaleur spécifique moyenne du Soleil; on aura soin seulement de ne comprendre sous ce terme que le quotient par la masse du Soleil de la quantité de chaleur rayonnée par lui effectivement pendant que sa température moyenne s'abaisse de 1°. On ne tient pas compte, dans cette définition, des changements physiques ou chimiques que peut éprouver une portion

[1] *Helmholtz,* comme nous le verrons dans un moment (p. 152), en supposant la nébuleuse solaire disséminée à l'origine dans une sphère de rayon égal à celui de l'orbite neptunienne, avait trouvé que, d'après le total de la chaleur développée par la condensation, celle-ci avait pu se produire pendant 20 millions d'années (avec le chiffre de Pouillet). *H. Faye,* en employant la constante de Violle et de Crova, trouve, pour le même nombre, 15 millions.

quelconque de sa substance. De même nous appellerons dilatation moyenne le rapport de la diminution réelle du volume pendant un abaissement de 1° C. de sa température moyenne, au volume actuel.

Admettons pour un instant que la chaleur spécifique moyenne soit égale à l'unité. Il serait naturel de supposer que la dilatation moyenne du Soleil, sous l'influence de la chaleur, ne diffère pas beaucoup de celle des corps terrestres. Si, par exemple, elle était égale à celle du verre solide, soit $\frac{1}{120\,000}$ en diamètre par degré et si la chaleur spécifique était celle de l'eau, le diamètre du Soleil se contracterait de $\frac{1}{1\,000}$ en

$$\frac{1}{1\,000} : \left(1{,}4 \times \frac{1}{120\,000}\right) \quad \text{ou} \quad 86 \text{ ans.}$$

Le nombre d'années ainsi trouvé est évidemment proportionnel au chiffre admis comme chaleur spécifique et en raison inverse du coefficient de dilatation choisi.

Or la contraction que la théorie de Helmholtz conduit à admettre comme probable nous permet de dire qu'une diminution de $\frac{1}{1\,000}$ en diamètre représente à à peu près 8600 années de chaleur au taux actuel, en prenant 4 calories environ comme constante solaire. Ce résultat est 100 fois plus fort que le précédent; il faut donc supposer, par exemple, une chaleur spécifique moyenne égale à 10 et un coefficient de dilatation égal au 1/10 de celui du verre solide. Ce dernier chiffre est presque sûrement trop faible, si l'on songe que l'on

a affaire à une masse fluide. Il est donc vraisemblable que la chaleur spécifique moyenne est bien supérieure à 10.

D'autre part, nous ne pouvons pas dire avec quelque probabilité que la dilatation de volume soit supérieure à $\frac{1}{400}$ par 1° C $\left(\text{celle du verre étant, en effet, } \frac{3}{120000} \text{ ou } \frac{1}{40000}\right)$. La chaleur spécifique moyenne du Soleil ne peut donc excéder 10000 fois celle de l'eau.

11. — Mais c'est plutôt l'origine probable elle-même de la chaleur du Soleil qui limite sa chaleur spécifique ; toute la chaleur que l'on peut attribuer à des causes naturelles *connues actuellement* n'aurait pas porté le Soleil, lors de sa formation, à 14000°[1] si la chaleur spécifique moyenne excédait 10000.

12. **Énergie de formation du Soleil.** — En effet, un calcul facile, fait d'ailleurs par *Helmholtz*, permet de se rendre compte que l'agglomération de météorites venant de l'infini en une seule masse égale à celle du Soleil ne saurait produire plus de 20 millions de fois le nombre annuel de calories obtenu par Pouillet. Cela revient à calculer l'énergie potentielle de gravitation du Soleil, ou encore celle qui serait nécessaire pour le désagréger entièrement en parcelles infiniment petites.

[1] C'est le chiffre adopté par Sir W. Thomson pour la température du Soleil : nous ne le discutons pas ici. Notons toutefois que si la température intérieure de l'astre surpasse de beaucoup 14000°, — comme c'est probable, — les raisonnements qui vont suivre ne perdront rien de leur valeur, bien au contraire.

Cette énergie serait, $d\mathrm{M}$ étant une couche concentrique matérielle :

$$\int f\frac{\mathrm{M}}{r}\,d\mathrm{M} = \int_0^{\mathrm{R}} \frac{f}{r}\,\frac{4}{3}\pi r^3\rho \times 4\pi r^2\rho\,dr,$$

ce qui fait :

$$\frac{16}{3} f\pi^2\rho^2\,\frac{\mathrm{R}^5}{5} = \frac{3}{5} f\,\frac{\mathrm{M}^2}{\mathrm{R}}.$$

Le calcul donne, en petites calories :

$$\frac{3}{5}\,\frac{6{,}5\ 10^{-8}\,.\,4\,.\,10^{66}}{7\,.\,10^{10}} \times \frac{1}{4{,}19\,.\,10^{7}} = 5{,}3\ 10^{40},$$

soit 20 millions de fois le chiffre de Pouillet, ou encore, par unité de masse, $2{,}8\ 10^{7}$ calories.

Or les chocs partiels, les résistances, etc., n'ont dû laisser au globe final, sous forme de chaleur, qu'une portion de l'énergie potentielle de gravitation disparue. Nous ignorons à la vérité quelle a pu être cette portion; il y a lieu de croire (d'après Thomson) qu'elle ne surpasse pas la moitié. 10 millions d'années de chaleur seraient donc le chiffre correspondant à un Soleil de densité uniforme, ce qui est loin d'être réalisé selon toute probabilité. Mais c'est faire largement la part de l'inconnu sous ce rapport que d'admettre un chiffre 5 fois plus fort que celui que nous venons d'obtenir comme ayant constitué la réserve initiale du Soleil.

13. **Conclusions cosmogoniques.** — On voit donc que la formation météorique du système solaire, à partir de masses disséminées à l'infini dans l'espace,

ne saurait dégager au maximum plus de $1{,}4 \times 10^8$ calories par unité de masse, ce qui limite la chaleur spécifique de l'astre quand on se donne sa température. Ainsi donc 10000 fois la chaleur spécifique de l'eau est un maximum : celle du Soleil est donc très probablement comprise entre 10 et 10000. On déduirait de là avec certitude que la température du Soleil s'abaisse de 100° dans un intervalle de temps compris entre $\frac{100}{1{,}4 \times 0{,}1}$ ou 700 ans et 700000 ans. Nous pourrions même, avec les évaluations plus modernes de la température globale du Soleil, réduire ce dernier chiffre à la moitié.

Les raisonnements qui précèdent conduiraient donc à attribuer au Soleil un avenir compris entre 50000 ans et 21 millions d'années et, en tenant compte de la probabilité des hypothèses faites, vraisemblablement de l'ordre de 5 à 10 millions.

On arrive encore à penser qu'il y a 1 million d'années le Soleil a du être notablement plus chaud qu'il ne l'est aujourd'hui et, par conséquent, s'il a existé comme source de chaleur pendant 10 ou 20 millions d'années dans le passé, il doit avoir rayonné pendant ce temps-là une quantité de chaleur bien supérieure au produit par ce nombre de la quantité rayonnée aujourd'hui en 1 an. On peut donc, semble-t-il, considérer comme très probable que le Soleil n'éclaire pas la terre depuis beaucoup plus longtemps. Et l'on voit, en résumé, que les calculs précédents nous mènent à des résultats comparables à ce que nous avons vu à propos de la théorie de Helmholtz.

14. — Il est extrêmement important de faire remarquer que tous les chiffres et calculs cités jusqu'à présent supposent la chaleur du Soleil uniquement engendrée par des chocs, des frottements, etc., et plus généralement par des causes connues à la fin du XIX^e^ siècle. Mais les découvertes de ces dix dernières années, relatives aux phénomènes de radioactivité, nous font entrevoir d'autres sources d'énergie ignorées auparavant et susceptibles de contribuer largement à l'entretien de la chaleur solaire. La théorie de *Helmholtz*, indiscutée il y a seulement quinze ans, n'est plus aujourd'hui, strictement parlant, la seule possible.

RÔLE DE LA DISSOCIATION

1. **Changements d'état physique.** — Cette théorie, initiatrice en quelque sorte des idées beaucoup plus hardies auxquelles nous venons de faire allusion, a été proposée par le *P. Secchi*[1] comme devant *contribuer* puissamment à expliquer l'entretien de la chaleur solaire : elle peut d'ailleurs revêtir diverses formes.

Secchi fait d'abord remarquer que les corps liquides ou gazeux, en changeant d'état, peuvent abandonner des quantités de chaleur relativement considérables : c'est ainsi que l'eau, en se solidifiant, dégage 80 petites calories par gramme ; la vapeur d'eau, en devenant liquide, en cède 537 environ et cela sans changer de température. On sait, d'autre part, qu'il existe un

[1] *Le Soleil*, II^e^ partie, p. 275. Paris, 1877.

état de la matière intermédiaire entre l'état liquide et l'état gazeux : l'état critique étudié jadis par *Cagniard-Latour* et depuis par *Andrews*. Dans les expériences terrestres, cette période critique est peu étendue; il ne doit sans doute pas en être de même dans le Soleil, qui doit renfermer, d'après Secchi, des masses très considérables de matière sous cette forme. Nous savons encore que vers cette période critique, de petites variations dans l'intensité des forces en jeu produisent des changements considérables dans le volume et la densité des corps.

2. — Il pourrait y avoir là une explication de la rapidité avec laquelle les protubérances changent de forme[1], et des vitesses prodigieuses qu'elles présentent. Il semble possible au P. Secchi que, par le refroidissement, une partie de la masse devienne liquide et qu'elle émette ainsi une grande quantité de chaleur : celle-ci, de latente devenant sensible, viendrait compenser les pertes dues à la radiation. Cette théorie rencontre une objection grave dans ce fait que les points critiques de la plupart des gaz sont à des températures relativement fort basses : au-dessus de ces températures, quelle que soit la pression, il ne peut y avoir liquéfaction, et il est fort peu probable qu'à la température du Soleil ce phénomène puisse avoir lieu.

3. **Dissociation chimique.** — Secchi se rendait sans doute compte de cette objection, car, sans insister davantage, il passe à la dissociation véritable. Même

[1] Cette idée a été reprise par Brester (voir plus haut, p. 68).

en admettant que la température du Soleil soit aussi basse, dit-il, que le veulent les savants français (et l'on sait aujourd'hui qu'ils avaient raison, au moins en ce qui touche la température superficielle); même dans ce cas elle serait certainement assez élevée pour maintenir les divers constituants matériels en état de dissociation, état où ils possèdent une quantité considérable d'énergie, qui se transforme en chaleur au moment de la combinaison. On sait, en effet, qu'aux hautes températures les corps simples, malgré l'affinité qui tend à les réunir, peuvent rester en présence sans se combiner; lorsque la température s'abaisse, la combinaison peut avoir lieu, mais elle est accompagnée d'un dégagement considérable de chaleur. C'est ainsi que la chaleur de dissociation de l'eau est égale à 3830 calories.

Supposons alors qu'une masse de gaz dissociés, de l'hydrogène et de l'oxygène, par exemple, passent à l'état de combinaison : toute la chaleur latente de dissociation se dégagera[1], et ralentira d'autant le refroidissement. Admettons que le rayonnement fasse perdre à cette masse une quantité de chaleur capable de la refroidir de 1° par an. Si, en vertu de ce refroidissement, la combinaison commence et s'étend progressivement à la masse entière, il y a dégagement de 3830 calories par gramme de matière, ce qui suffit précisément à retarder de 3830 ans le refroidissement initial (en supposant la chaleur spécifique égale à 1).

[1] Cet exemple fait bien voir qu'il ne s'agit là que d'une cause accessoire de la radiation solaire; il n'y a dans le phénomène cité qu'une combustion, et la chaleur dégagée ne peut être que relativement très limitée.

Le raisonnement précédent pourrait se faire évidemment avec d'autres composés que l'eau.

Malheureusement il est presque certain qu'à la température du Soleil, aucun corps composé ne peut exister : cela revient à dire que cette température est par trop supérieure aux points de dissociation connus et classés jusqu'ici pour que le jeu des phénomènes décrits par Secchi ait de grandes chances de se réaliser. Il est même fort peu probable qu'il en soit ainsi.

4. **Travaux de Lockyer.** — Le fait de la dissociation générale des matières solaires, au sens de la chimie, n'est donc guère douteux ; ce qui est plus audacieux, c'est l'extension donnée à cette idée par *Sir Norman Lockyer*[1], indépendamment d'ailleurs de toute application à l'entretien de la chaleur solaire. Lockyer remarque l'absence, dans le spectre du Soleil, de nombreuses raies données cependant par l'élément terrestre correspondant. Quand nous disons que le fer se trouve dans le Soleil, cela ne signifie pas que toutes les raies du fer s'y observent ; mais seulement, un plus ou moins grand nombre d'entre elles. De plus, beaucoup de corps, le calcium en particulier, n'ont pas le même spectre aux différentes températures. Pour ce dernier élément, par exemple, les étincelles électriques les plus chaudes donnent la prédominance aux raies H et K de Fraunhofer, tandis que, la température diminuant, ces raies arrivent à disparaître tout à fait. Lockyer en conclut que la molécule de calcium s'est dissociée en

[1] *Chemistry of the Sun.* Londres, Macmillan, 1887. — *L'Évolution inorganique.* Bibl. scient. internat. Paris, Alcan, 1905. — A. Cortie, *Monthly Notices,* vol. LI, p. 76.

corps plus simples, inconnus jusqu'ici, qui n'existent pas à l'état libre aux températures usuelles. Il en serait de même de beaucoup de nos prétendus éléments chimiques.

5. — Les spectres des taches solaires et des protubérances viennent renforcer cette idée : les diverses raies d'un même élément s'y comportent, en effet, différemment. Ainsi, dans les taches, certaines raies d'un corps sont élargies et assombries; d'autres, non[1]. Dans les protubérances, tandis qu'une raie indique une certaine vitesse radiale, d'autres correspondant au même élément en révèlent parfois une différente. On ne peut soutenir que le corps en question a plusieurs spectres, lesquels apparaîtraient selon les circonstances, car le groupement des raies tordues, déplacées ou élargies ne présente pas de loi. Tous ces phénomènes sont difficilement explicables par les théories ordinaires; nous avons vu que *Julius* les utilisait largement. Mais le principe posé par Lockyer permet de tout expliquer sans peine.

6. — D'autres arguments militent en faveur de cette idée. Les recherches spectroscopiques de *Crookes*[2], poursuivies suivant des voies complètement différentes[3],

[1] On sait aujourd'hui, depuis l'expérience de Hale, que l'effet Zeeman peut expliquer ces apparences. — Voir p. 318.

[2] *Nature*, 14 octobre 1886.

[3] Il s'agit de la classification des diverses raies d'un même spectre en séries selon leurs positions et leurs longueurs d'onde. La formule de *Balmer* pour l'hydrogène donne un exemple d'une de ces séries généralisées depuis par les travaux de Deslandres, de Kayser et Runge. On peut consulter sur ce sujet O. D. Chwol-

l'ont conduit à des résultats analogues : c'est ainsi qu'il a pu séparer l'yttrium en 5, et peut être en 8 constituants.

7. — Une objection grave vient du nombre considérable d'éléments *plus simples* qu'il nous faudrait alors imaginer; car certains corps, comme le fer, renferment 5000 raies et plus. Leurs constituants se compteraient par dizaines, si ce n'est par centaines, et l'on sait maintenant que les coïncidences de raies qu'on avait cru observer d'un élément à un autre disparaissent presque invariablement avec une dispersion plus forte. Ce dernier fait ne laisse pas d'être assez inquiétant pour l'avenir de la théorie, au moins dans cette direction.

8. — Lockyer admet cependant l'existence d'éléments primordiaux peu nombreux. Il faut avouer, d'une façon générale, que sa thèse, déjà suggérée par Secchi[1], cadre singulièrement avec les travaux récents sur la radioactivité et sur les transformations des éléments les uns dans les autres (du radium en hélium par exemple). Nous reviendrons du reste sur ces questions.

THÉORIE DE SIR WILLIAM SIEMENS

1. **Principes généraux.** — C'est encore à la dissociation que se rattache l'explication du rayonnement proposée en 1882 par le célèbre ingénieur anglais

son, *Traité de Physique*, t. II, p. 287-290, et aussi Lockyer, *Evolution inorganique*, p. 128 et 178.

[1] *Le Soleil*, p. 278, t. II.

W. Siemens[1]. De graves objections l'ont fait rejeter, bien qu'elle soit au premier abord assez séduisante : nous la résumerons en quelques pages.

Siemens cherche à expliquer l'entretien de la chaleur solaire par un mécanisme analogue à celui des hauts fourneaux à récupération. Il remarque que la terre n'intercepte que le $2\,250\,000\,000^{e}$ de la radiation solaire totale. Les autres planètes n'en arrêtent guère plus de 10 fois ce chiffre ; il en résulte que la presque totalité de la chaleur émise va dans l'espace et semble s'y perdre sans retour.

Les régions interstellaires ne sont peut-être pas rigoureusement vides de matière; Siemens les croit remplies de gaz raréfiés, formés principalement d'hydrogène, d'oxygène, d'azote, de carbone et des composés de ces corps et, outre tout cela, de matières solides sous forme de poussières. Ce sont ces gaz et ces poussières qui serviraient de combustibles[2]. Chaque planète se forme ainsi une atmosphère de ces gaz, selon l'attraction qu'elle est capable d'exer-

[1] *Proceedings Roy. Soc. of London,* vol. XXXIII, 1882, p. 389. — Voir aussi *Nature,* t. XXV, 1881-1882, p. 440.

[2] Sous ce rapport, la théorie de Siemens n'était pas nouvelle. Sir William Grove (*Discours présidentiel à l'Ass. Brit.* en 1866) avait déjà cherché à expliquer la chaleur solaire par la condensation du milieu interstellaire que le Soleil rencontre dans sa course à travers l'espace. Mattieu Williams, dans son livre *The Fuel of the Sun* (1860), soutient une opinion de même genre, en y ajoutant comme Siemens une sorte de « respiration » de l'astre tout entier, mécanisme qui permettait au Soleil de rejeter les gaz cosmiques à l'état froid et raréfié après leur avoir pris par condensation toute leur chaleur interne. Ces deux auteurs ne semblent pas cependant avoir, autant que Siemens, examiné et cherché à réfuter sérieusement les objections évidentes qu'on pouvait leur faire.

cer; les corps plus légers prédominent alors dans l'espace. Le système solaire, dans son ensemble, doit attirer la matière gazeuse de tout l'espace et être lui-même enveloppé d'une atmosphère intermédiaire comme densité entre celles des planètes et la matière cosmique raréfiée.

2. — En faveur de cette hypothèse, on peut dire que la théorie cinétique des gaz n'assigne pas de limites à une atmosphère gazeuse. Des savants fort éminents : *Humboldt*, *Zöllner*, *Newton* lui-même, se sont montrés favorables à l'idée d'un espace non entièrement vide[1]. De plus, les analyses de météorites ont prouvé qu'elles contenaient en moyenne plus de 6 fois leur volume de gaz occlus, dont certains n'existent pas dans notre atmosphère. Ces gaz se retrouvent, au contraire, chez les comètes, ce qui tendrait à prouver leur origine interstellaire.

Malheureusement on peut objecter l'absence de toute résistance dans les mouvements orbitaux des planètes. Siemens répond que si la matière emplissant l'espace est un fluide presque parfait sans surfaces limites, on peut établir par des raisons purement mécaniques que le retard par friction doit être très faible, même aux vitesses planétaires. Il se produirait alors, sans doute, un phénomène comparable au mouvement uniforme,

[1] Tout récemment, des idées analogues sur ce point à celles de Siemens ont encore été soutenues par M. Newall, l'éminent astronome de Cambridge (*Monthly Notices*, décembre 1907). Des études spectroscopiques sur le Soleil ont conduit M. Newall à admettre la présence de cyanogène très raréfié dans les espaces interplanétaires.

dans un liquide non visqueux, d'une sphère pleine : une partie du fluide est entraînée, s'ajoute à la masse du corps immergé, et il n'y a pas de résistance.

Le Soleil devrait aussi attirer les gaz les moins diffusibles, c'est-à-dire les plus lourds, alors que l'analyse spectrale y révèle, au contraire, la prédominance de l'hydrogène. Toutefois, à la température du Soleil, des phénomènes de dissociation ont probablement lieu, qui suffisent à rejeter à une certaine distance les gaz composés.

3. **Rôle du Soleil.** — Ces prémisses une fois admises, Sir. W. Siemens pense, — et nous verrons que c'est là le point faible, — que la force centrifuge du Soleil doit lui faire jouer le rôle d'un immense soufflet.

Les gaz cosmiques, par son action, sont repoussés des régions équatoriales du système, et par suite attirés vers les pôles du Soleil. Des torrents énormes de ces gaz et notamment d'oxygène se précipitent ainsi sur l'astre incandescent, s'y échauffent, et en même temps y deviennent plus denses. Quand ils atteignent la photosphère, parvenus à la température de dissociation correspondant à leur pression, ils s'enflamment en dégageant de la chaleur. Les produits de cette combustion : oxyde de carbone, acide carbonique, vapeur d'eau, sont alors rejetés à l'équateur et repoussés par la force centrifuge dans les espaces interstellaires. Que deviennent-ils ensuite ? Evidemment ils viennent atténuer le pouvoir calorifique des gaz dissociés que leur courant va rencontrer. Mais il est probable, dit Siemens, que la radiation solaire elle-même a pour effet de les ramener

à l'état de dissociation primitif, et cela aux dépens de l'énergie solaire annuellement dissipée.

Afin d'appuyer cette manière de voir, Siemens fait observer que la température de dissociation varie avec la pression et est d'autant plus élevée que celle-ci l'est elle-même. La pression des espaces interstellaires étant excessivement faible, il est dès lors admissible que la dissociation puisse s'y effectuer à des températures relativement très basses, tandis que la combustion des mêmes corps peut élever le Soleil, sous des pressions plus fortes, à des températures considérables.

D'autre part l'énergie rayonnante, ajoute-t-il, possède un pouvoir de dissociation très intense qui dépasse celui de la chaleur fournie directement. C'est ainsi que, dans les cellules des feuilles, la lumière solaire, dissocie en leurs éléments l'acide carbonique et la vapeur d'eau atmosphériques, et cela à la température ordinaire.

4. **Cycle des phénomènes.** — On aperçoit donc nettement le cycle des phénomènes dans la conception de l'auteur. Dissociés par la radiation solaire les produits de la combustion reviennent à l'état primitif; et le système peut continuer presque indéfiniment à fonctionner de la sorte, l'énergie perdue n'étant qu'une portion infime de celle récupérée.

Il est vrai que les produits de la combustion de l'hydrogène et de l'oxyde de carbone sont plus denses que ces gaz eux-mêmes; mais cette différence de poids spécifique peut être compensée par la température plus élevée du courant de sortie. La compensation ne

doit sans doute pas se produire pour les vapeurs métalliques lourdes qui, elles, obéissent à l'attraction solaire et constituent la couche renversante donnant naissance au spectre d'absorption de Fraunhofer.

A la surface de séparation des deux atmosphères (celle des gaz et celle des vapeurs de la couche renversante), peuvent avoir lieu des tourbillons et des frottements accompagnés d'éruptions violentes : ce seraient les protubérances.

Comme tout le système solaire est animé d'un mouvement de translation général quatre fois moins rapide environ que celui annuel de la terre, il est fort possible que les combustibles gazeux n'offrent pas dans tout l'univers le même état de condensation. Siemens pense pouvoir expliquer ainsi les variations observées[1] de la chaleur solaire, et indirectement les taches, par des changements accidendels de température dans la photosphère.

L'idée d'un milieu interplanétaire paraît également favorable aux phénomènes de la lumière zodiacale et des comètes. C'est ainsi, par exemple, que, chez les météorites des noyaux cométaires, les gaz occlus pourraient fort bien donner lieu à des queues anomales dirigées vers le Soleil; on serait également débarrassé, par l'hypothèse de Siemens, des vitesses fantastiques que les théories ordinaires conduisent à attribuer aux queues de certaines comètes, celle de 1843 entre autres. Nous devons du reste convenir qne l'aspect des comètes suggère parfois l'idée d'un fluide cosmique émanant du Soleil, et dont les lignes de courant représenteraient les différentes queues.

[1] La période glaciaire, par exemple.

On voit donc que, si l'on admet le principe de la théorie de Siemens, un grand nombre de phénomènes s'expliquent et, de plus, la durée passée et à venir du Soleil se trouve considérablement prolongée, bien que, cela va sans dire, la récupération ne puisse, dans aucun cas, être totale.

5. **Polémiques.** — Comme on peut le penser, à cette théorie hardie les objections n'ont pas manqué.

En premier lieu, la masse totale du système solaire serait considérablement accrue par les gaz combustibles, qui finiraient graduellemant par tomber sur le Soleil. *Faye* a calculé[1] que, à $\frac{1}{2000^{\circ}}$ d'atmosphère, les gaz présents dans les limites du système solaire pèseraient 100000 fois plus que le Soleil lui-même. Siemens répond[2] qu'aux très basses pressions les molécules gazeuses sont séparées par des intervalles relativement larges, et que les forces d'expansion et de diffusion font équilibre à l'attraction. On a alors affaire à la matière radiante de *Crookes*.

De plus, les milieux cosmiques sont à des températures sans doute excessivement basses, sûrement comprises entre — 63° et le zéro absolu (— 63° était alors la plus basse température terrestre observée). Et à — 130°, en extrapolant les tables de Regnault, la tension de la vapeur d'eau n'est plus que de $\frac{1}{50000000}$ d'atmosphère. A $\frac{1}{1000000}$ d'atmosphère, il suffirait de

[1] *C. R.*, t. LXXXXV, 1882, p. 612.
[2] *C. R.*, t. LXXXXV, 1882, p. 769.

supposer aux courants gazeux une vitesse de 1 kilomètre par seconde pour entretenir la chaleur solaire.

6. — *Hirn*[1], qui engagea à ce propos une interminable polémique avec Siemens, fit remarquer qu'à la température du Soleil tout devrait être dissocié : les résidus de combustion décomposés par la radiation ne pourraient alors, en revenant sur le Soleil, comme le veut Siemens, dépasser une certaine zone; dès qu'ils arriveraient à une certaine distance de l'astre ils se formeraient à nouveau en dégageant de la chaleur, mais sans profit pour le Soleil lui-même. De plus, si la radiation solaire sert à dissocier des corps avant de nous arriver, son intensité doit diminuer plus vite que ne l'exige la loi de l'inverse carré. Or cette loi est considérée comme exacte dans tout l'univers stellaire.

Siemens répliqua[2] que la température de la photosphère ne devait pas considérablement dépasser celle de l'arc électrique, ce qui permettrait la combustion dans le soleil même; *H. Saint-Claire-Deville* a en effet montré qu'à la pression atmosphérique et à 2800° C. la tension de dissociation de la vapeur d'eau est 0,5, c'est-à-dire que la moitié de la vapeur subsiste (l'autre étant un mélange d'oxygène et d'hydrogène). Pour ce qui est de la seconde objection, il a été démontré qu'une quantité considérable de la lumière solaire se perdait par absorption[3] avant son entrée

[1] *C. R.*, t. LXXXXV, 1882, p. 812.
[2] *C. R.*, t. LXXXXV, 1882, p. 1037.
[3] Voir p. 123.

dans notre atmosphère. L'apparence de la couronne[1] montre d'ailleurs l'atmosphère solaire s'étendant à des millions de lieues, et les belles recherches d'*Abney* sur le spectre infra rouge ont établi l'existence de gaz carbonés à basse température entre le Soleil et nous[2].

7. **Résistance du milieu supposé.** — L'objection de la résistance qu'opposerait le milieu interstellaire aux mouvements célestes a été faite bien des fois. *Hirn*[3], notamment, a calculé qu'un milieu de densité égale à $1{,}4\ 10^{-12}$ suffirait à faire varier la durée de l'année de $1^{m},5$ en 3000 ans, chose déclarée en fait impossible par *Laplace*. Siemens s'en tire, nous l'avons vu, par la théorie du fluide parfait, que certaines expériences anglaises[4] tendraient à corroborer dans la pratique. Il est pourtant incontestable que les bolides s'enflamment dans les hautes régions de l'atmosphère, malgré la raréfaction extrême qui y règne; il y a d'ailleurs quelque chose de plus grave : les calculs de la balistique fondés sur la résistance de l'air, c'est-à-dire sur l'idée expérimentale du frottement dans les gaz, sont d'une précision presque parfaite.

[1] La bizarre loi de *Carrington* sur la rotation solaire paraît aussi à Siemens d'accord avec sa théorie. Le courant de matières nouvelles doit tendre en effet à ralentir la rotation aux pôles. Pour ce qui est des apparences de la couronne, surtout aux époques de minimum, il est certain qu'elles *semblent* favoriser Siemens.

[2] Voir notamment : Knut Angström, *Journal de Physique*, t. X, p. 141.

[3] Voir les notes précédentes de Faye et Hirn.

[4] D'après celles-ci, la résistance d'un fluide serait loin d'être proportionnelle à la surface (expériences de *W. Froude*, citées par Chwolson, *Traité de Physique*, t. I, p. 722). Les études modernes sur l'aviation confirment d'ailleurs ces recherches.

8. **La conservation de l'énergie est-elle respectée?** — A côté de cela, la théorie de Siemens soulève encore une autre objection qui ne peut guère manquer de venir à l'esprit[1]. Quand on y regarde de près, on s'aperçoit que toute l'énergie perdue par le Soleil vient en définitive de sa force vive de rotation, sans laquelle tout le système aurait un fâcheux air de mouvement perpétuel. La dissociation dans l'espace absorbera en effet, précisément, autant d'énergie solaire que la recombinaison des éléments pourra en fournir. Ce ne serait plus que la compression adiabatique des gaz dans le Soleil qui pourrait réellement lui apporter de la chaleur; mais alors, une fois entrés dans la fournaise, ces gaz ne pourraient plus surmonter l'attraction solaire : c'est pour cette raison que Siemens tient à ce qu'il y ait dans l'astre même une cause tendant à les en expulser. Malheureusement, la force vive de rotation du Soleil, à laquelle tout se ramène, ne constitue pas un réservoir d'énergie bien considérable. *Sir W. Thomson* a calculé qu'elle équivalait à 116 années de rayonnement[2] : c'est assez peu, même s'il y a récupération de la chaleur rayonnée dans les espaces célestes inoccupés. Il est bien difficile, en effet, d'imaginer que celle-ci puisse être totale.

9. — Mais surtout on ne peut se figurer comment un courant d'énergie de puissance presque égale à celle du rayonnement solaire se dirigerait continuellement vers le Soleil sans avoir jamais été observé, sans que rien, d'une manière directe ou indirecte, ait jamais pu

[1] *Nature*, vol. XXV, 1881-1882, p. 504, 601.
[2] *Conférences et Allocutions*, trad. P. Lugol, p. 276.

en révéler l'existence : il y aurait là une étrangeté dont l'invraisemblance saute aux yeux.

Toutes ces raisons nous forcent à renoncer à la théorie de Siemens.

ÉNERGIE SOLAIRE ET RADIOACTIVITÉ

1. **Entrée en ligne d'une nouvelle source d'énergie.** — Depuis ces dernières années, la découverte du radium, ou plus exactement des corps radioactifs, a produit dans toute la physique une révolution considérable : une nouvelle source d'énergie s'est tout à coup révélée dans certaines formes de matière. On avait d'abord pensé à en attribuer la cause à des radiations inconnues, d'origine cosmique peut-être et parcourant l'espace en tous sens, que seuls les corps doués de la nouvelle propriété transformeraient en énergies connues. Cette hypothèse paraît maintenant abandonnée, et il semble bien établi que c'est dans la matière elle-même, non plus dans la molécule, mais dans l'atome chimique qu'il faut localiser la nouvelle énergie.

2. — Et les phénomènes de la radioactivité, joints à l'ensemble des travaux modernes sur la physique des électrons, sont venus démontrer que cette source d'énergie est prodigieuse[1], tellement grande que les chiffres qui la mesurent semblent défier l'imagination.

[1] Pour en donner une idée, le professeur J. J. Thomson, dans *Electricity and matter* (Londres, Constable, 1905, p. 109), calcule la quantité d'énergie contenue dans un gramme d'hydrogène, et

3. **Calculs de W. E. Wilson et G. H. Darwin.** — La première idée de l'existence possible du radium ou des corps radioactifs[1] dans le Soleil a été émise, croyons-nous, par *M. W. E. Wilson*[2]. Ce physicien, s'appuyant sur un résultat de Curie, s'est demandé quel serait le poids du radium nécessaire à l'entretien de la radiation solaire. *Curie* avait trouvé que 1 gramme de radium émet 100 calories par heure[3]. En adoptant pour la radiation solaire le chiffre de *Langley*, un des plus élevés, comme on sait, soit 828000000 de calories par centimètre carré et par heure, on trouve que $3^{g},6$ de radium par mètre cube de la masse solaire suffiraient. M. Wilson émet d'ailleurs l'idée qu'à la température du Soleil le pouvoir rayonnant du radium est peut-être intensifié.

4. — Le professeur *G. H. Darwin*[4] a également été intéressé par cette question. Il rappelle que, dans

il trouve 10^{19} ergs, soit l'énergie suffisante pour élever 1 million de tonnes à plus de 100 mètres. Cette énergie serait proportionnelle au poids moléculaire. Il est vrai que, depuis le calcul précédent, de nouvelles expériences ont amené le professeur Thomson à modifier ses idées sur le nombre de corpuscules présents dans l'atome, nombre qui serait de l'ordre du poids moléculaire et non plus de l'ordre de 1000 (voir *The corpuscular Theory of Matter*, Constable, 1907). Cela réduirait le chiffre cité, et il ne s'agirait plus, selon nous, que de soulever une tonne à 100 mètres, ce qui est encore fort respectable. D'ailleurs, il est bon de dire que d'autres auteurs sont beaucoup moins modérés.

[1] Dans tout ce qui suit, nous ne distinguerons souvent pas entre le radium et les autres métaux radioactifs du même groupe : nous supposerons dans les calculs les proportions de ces derniers exprimées en quantités équivalentes de radium.

[2] *Nature*, vol. LXVIII, 1903, p. 222.

[3] J. J. Thomson, *Electricity and matter*, p. 154.

[4] *Nature*, vol. LXVIII, p. 496.

leur « Treatise of Natural Philosophy » (App. E), *Tait* et *Thomson* déclarent que le Soleil n'a très probablement pas illuminé la terre pendant 100 millions d'années, et presque certainement pas pendant 500 millions. A moins d'imprévu, l'avenir ne nous réserve sans doute qu'un petit nombre de millions d'années. Mais le radium est précisément un de ces imprévus, de sorte que nous ne pouvons plus guère nous prononcer, ni sur l'avenir, ni sur le présent.

L'énergie perdue par la concentration solaire[1] est $\frac{3}{5} f \frac{M^2}{R}$, soit environ $2{,}7\ 10^7$ M. La valeur de cette expression avec la constante de Langley est 12 millions d'années de rayonnement, qu'on peut porter à 60 pour tenir compte de l'accroissement de densité vers le centre. Lord Kelvin admettait, nous venons de le voir, un maximum de 100 millions. M. Darwin, tout en trouvant ces majorations un peu fortes, les accepte, du moins provisoirement.

D'autre part *Rutherford* a établi que 1 gramme de radium, dans tout le cours de son existence[2], émet 10^9 calories. Si donc le Soleil était formé tout entier de radium, il pourrait émettre 10^9 M calories, et cela sans faire intervenir l'énergie de gravitation. Or ce chiffre est 40 fois plus fort que celui de la chaleur perdue par le Soleil condensé de Kelvin. M. Darwin pense donc que, vu la quantité considérable d'énergie interne que nous attribuons à présent à la matière, il est possible que le Soleil puisse libérer l'énergie ato-

[1] Voir plus haut, p. 152.

[2] On sait en effet que le radium n'aurait, dans les nouvelles théories, qu'une durée limitée.

mique à un degré au moins comparable à celui du radium. On pourrait donc augmenter les estimations relatives à l'énergie solaire et les multiplier par un facteur égal à 10 ou 20.

5. **Objections.** — Une objection a été faite à la possibilité de l'existence de substances radioactives dans le Soleil. M. *W. B. Hardy*[1] a fait remarquer que les différentes sortes de radiations émises par ces subtances devraient nous parvenir du Soleil, notamment les plus pénétrantes, les rayons β et γ. Or on sait qu'une solution d'iodoforme dans le choloroforme est très sensible aux rayons β et γ : 5 milligrammes de bromure de radium suffisent à donner au liquide une coloration pourpre, même après avoir traversé une lame de plomb de 1 centimètre d'épaisseur. Si (maintenant) l'on interpose le plus mince écran opaque entre la solution et les rayons du Soleil, — cela afin d'éviter toute action calorifique, — le réactif ne manifeste rien, même après plusieurs jours. Il semblerait donc que le Soleil ne peut émettre les rayons fournis en abondance par les corps radioactifs et, par suite, qu'il ne saurait contenir une quantité appréciable de ces éléments.

M. *R. J. Strutt*[2] répondit à l'objection précédente. Admettons pour la teneur du Soleil en radium le chiffre de W. E. Wilson, soit $3^{g},6$ de radium par mètre cube. L'expérience prouve que lorsque les rayons de Becquerel ont à traverser un écran de plomb de plus de 1 centimètre d'épaisseur, la radiation transmise ne contient plus sensiblement que des

[1] *Nature*, vol. cité, p. 549.
[2] *Nature*, vol. cité, p. 572.

rayons γ, — les plus pénétrants d'ailleurs, car ce sont ceux qui se rapprochent le plus des rayons Röntgen. Or ces rayons γ perdent la moitié de leur intensité en traversant 8 centimètres d'aluminium ou, dans le cas d'écrans d'une autre substance, une couche d'égale masse par unité de surface. Mais l'atmosphère terrestre équivaut en masse à 76 centimètres de mercure ou à 89 centimètres de plomb : elle constitue ainsi une couche matérielle bien plus absorbante qu'une lame de plomb de 1 centimètre. La méthode essayée ne pouvait donc rien donner.

6. — Il y a plus : il faut encore tenir compte de l'absorption des radiations à travers la masse même du Soleil. En supposant le coefficient d'absorption toujours proportionnel à la densité, ce qui est probable, M. Strutt trouve que l'effet radioactif du Soleil sur la terre doit être $1{,}5\ 10^{19}$ fois plus fort que celui de 1 gramme de bromure de radium à même distance. Or les rayons γ émanés de 10 milligrammes du précieux produit peuvent à peine être décelés par la méthode électrique dès que 10 centimètres de plomb sont interposés entre le corps actif et l'appareil de mesure. Pour savoir si les rayons Becquerel émanés du Soleil peuvent être reconnus, nous devons comparer les chiffres ci-dessus à ceux correspondant à la radiation solaire, en tenant compte de la distance et de l'absorption atmosphérique.

La distance du bromure de radium à l'appareil de mesure était, dans l'expérience de Strutt, de 10 centimètres environ : celle du Soleil à la terre est $1{,}5\ 10^{12}$ fois plus grande.

L'effet du Soleil est donc équivalent à celui de $\frac{1{,}5\,10^{19}}{(1{,}5)^2\,10^{24}}$, soit $6{,}7\,10^{-6}$ grammes de radium situés à 10 centimètres de l'appareil.

Ce dernier poids n'est pas la millième partie du radium de l'expérience citée et, de plus, au lieu d'avoir à traverser 10 centimètres de plomb, la radiation solaire doit franchir l'atmosphère terrestre. Les rayons de Becquerel que le Soleil pourrait émettre seraient donc des millions de fois plus faibles que ceux étudiés sur la terre. Le fait que l'on ne constate rien, même avec les méthodes de mesure les plus sensibles, n'a donc aucune signification.

7. — D'autre part, on a fait remarquer[1] que pas une des raies du radium ne figurait dans le spectre solaire. Notamment dans le spectre ultra-violet de ce corps, étudié par *Crookes*[2], la plus forte raie a pour longueur d'onde 3814,661 ; elle est très près de la raie solaire λ 3814,671 attribuée au fer et au carbone, mais ne coïncide pas avec elle. Cette absence du spectre du radium dans le Soleil ne prouve encore rien : vu la dilution extrême que suppose le calcul de M. Wilson $\left(\frac{1}{500\,000}\right)$, les raies du radium seraient invisibles[3].

8. **La radioactivité et la chaleur de la terre.** — Mais, s'il paraît impossible de prouver que le Soleil

[1] *Nature*, vol. LXIX, p. 12.

[2] *Proceedings of the Roy. Soc.*, vol. LXXII, n° 482, 1904, p. 295.

[3] Voir à ce sujet l'excellent article de M. Ch.-Éd. Guillaume (*R. G. des Sc.*, 1904, vol. XV, p. 576).

ne contient pas de radium, il y a par contre de sérieux arguments en sens contraire. En premier lieu figure la présence du radium en quantité notable à l'intérieur de la terre. Une courte digression nous semble ici nécessaire.

On sait qu'à la suite de la découverte de nombreux corps radioactifs[1], — peu répandus pour la plupart, — des recherches ont été entreprises pour découvrir chez d'autres éléments des traces de propriétés analogues. L'atmosphère terrestre, la pluie furent trouvées radioactives; puis *Elster* et *Geitel* constatèrent[2] qu'il en était de même de l'air confiné dans les caves et dans les puits, comme si le sol lui-même dégageait la même émanation que le radium. Les sources thermales, la vase qu'elles déposent présentent les mêmes phénomènes, et tout porte à croire que la radioactivité de l'atmosphère, ainsi que l'existence parmi ses constituants de l'hélium, sont dus à l'influence du sol. Enfin *A. S. Eve*[3], de Montréal, a pu calculer, à la suite d'expériences comparatives faites à l'Université Mac-Gill, que la croûte terrestre, jusqu'à une profondeur de quelques mètres, devait contenir plusieurs centaines de tonnes de radium. Ces faits établis, on s'est demandé si la chaleur interne du globe ne pouvait pas être entretenue par cette cause, et l'on a repris les calculs de *Lord Kelvin*[4] sur l'âge

[1] Pour tout ce qui concerne la radioactivité, voir Rutherford, *Radioactive Transformations*. Londres, Constable, 1906.

[2] *Physik. Zeit.*, III, p. 574, 1902.

[3] *Phil. Mag.*, juillet 1905.

[4] *Lord Kelvin*, en supposant la terre originairement à l'état fluide et en appliquant les lois de Fourier sur le refroidissement, avait trouvé, pour l'âge de la terre, 100 millions d'années. Plus tard, il réduisit ce chiffre à 40 millions.

du globe. On a trouvé[1] que la présence de $0^g,05$ de radium par million de tonnes compenserait la perte de chaleur par conduction. Or ces résultats sont précisément de même ordre que ceux obtenus par *Strutt* et par *Eve* qui, dans des roches provenant de diverses régions du globe[2], avaient trouvé $1^g,4$ et $1^g,1$ de radium par million de tonnes. Il y a donc de grandes chances pour qu'une partie considérable de la chaleur du globe provienne de cette origine ; on pourrait alors assigner au passé de notre planète une durée compatible avec les évaluations géologiques les plus modérées.

Les évaluations des géologues manquent assurément de précision et sont sujettes à bien des objections ; mais il est remarquable qu'elles donnent toutes, pour la

[1] Voici comment l'on peut arriver à ce résultat. La chaleur perdue par conduction en calories-grammes par seconde est d'après les lois connues :

$$Q = 4\pi R^2 K \frac{dT}{dr}$$

(R = rayon de la terre, K = coefficient de conductibilité, $\frac{dT}{dr}$ = accroissement de la température avec la profondeur).

Soit X la quantité de chaleur libérée en moyenne par seconde et par cm^3 en raison de la présence dans le globe de matières radioactives. On aura :

$$X \frac{4}{3} \pi R^3 = 4\pi R^2 K \frac{dT}{dr}, \quad \text{ou} \quad X = \frac{3K}{R} \frac{dT}{dr}.$$

Admettons pour K le chiffre de Kelvin 0,004, pour $\frac{dT}{dr}$ 37° par kilomètre, ou 0,00037 par centimètre, il vient $X = 7{,}10^{-15}$, soit $2{,}2\ 10^{-7}$ petites calories par an. On arrive donc à une teneur en radium de $2{,}6\ 10^{-13}$ grammes par cm^3, soit $4{,}6\ 10^{-14}$ par gramme de matière, ce qui fait $0^{gr},046$ par million de tonnes.

[2] C'est-à-dire même de diverses parties du monde : la similitude des résultats tendrait à prouver que la teneur en radium varie peu d'un endroit à un autre.

seule durée des périodes géologiques, des chiffres énormes dépassant souvent 100 millions d'années[1] et atteignant 500 et 1000 millions. Le désaccord qui atteignait non seulement les calculs de Lord Kelvin sur le refroidissement terrestre frappait à plus forte raison ceux fondés sur la théorie de Helmholtz et relatifs à l'âge du Soleil. La présence certaine du radium ou de corps radioactifs similaires, tels que l'uranium, le thorium, le polonium dans la masse terrestre, leur inflence presque certaine dans l'entretien de la chaleur centrale, sont autant d'arguments en faveur de phénomènes analogues dans le Soleil.

9. **Autres arguments.** — Il y a autre chose : on sait que le radium (et beaucoup de ses congénères) dégagent une sorte de gaz, l'émanation, qui a lui-même la propriété de se convertir spontanément, au bout d'un certain temps, en hélium. Or l'hélium se trouve en quantités considérables dans le Soleil; c'est même là qu'il a été découvert. Et d'autre part, sur la terre, il a toujours été trouvé associé avec des métaux radioactifs. *Rutherford*[2] considère même que tout l'hélium que

[1] Un savant anglais, M. Joly, a récemment imaginé une méthode d'estimation qui paraît plus sûre que toutes les autres estimations géologiques (*Trans. Roy. Dub. Soc.*, vol. VII, séries 3, 1902, p. 22-66). Il se fonde sur la quantité de sel contenue dans la mer, quantité qui va toujours en augmentant : l'évaporation des mers cause les pluies, et celles-ci, en lavant les continents, se chargent du sel que les rivières apportent continuellement avec elles. M. Joly trouve que, vu la teneur en sel des eaux de rivière, ces phénomènes ont dû se poursuivre pendant 100 millions d'années environ. (Voir à ce sujet Ch. Darwin, *Discours de la British Association.* — *Nature*, vol. LXXII, 1905, p. 443.)

[2] *Radioactive Transformations.* Londres, Constable, 1906, p. 181.

l'on peut trouver à l'état libre sur la terre provient de la désagrégation de ces corps. L'hélium chromosphérique pourrait donc fort bien avoir la même origine, et l'on peut dire sans crainte que c'est même l'hypothèse la plus vraisemblable.

10. — Notons en passant un point qui peut avoir son intérêt : les corps radioactifs sont généralement affectés de poids atomiques élevés ; or le Soleil paraît renfermer, d'une façon prédominante, les corps de forts poids atomiques. Le fait n'est pas très accentué, puisqu'on y rencontre l'hydrogène et le sodium, par exemple ; mais il est incontestable. D'ailleurs il s'expliquerait fort bien avec les idées admises sur la formation solaire : dans un amas de matière fluide soumise à l'action de la gravitation, ce sont les corps les plus lourds qui ont tendance à aller au centre. Et il est naturel qu'ils s'y trouvent en plus forte quantité que dans les masses planétaires secondaires, nées à la périphérie de la nébuleuse primitive.

11. — Jusqu'ici, dans les expériences qui ont été faites, on n'a pas trouvé d'influence appréciable de la température sur la radioactivité [1]. Mais il est juste de dire que nous n'avons, bien entendu, aucune expérience des températures de l'ordre de celle du Soleil, et il est fort possible que, à ces températures, un grand nombre de matières se trouvent dans l'état de transformation où nous voyons aujourd'hui le radium. On sait en effet ce qui, dans les idées des physiciens anglais principale-

[1] A quelques degrés au-dessus de 0° absolu, le rayonnement du radium ne semble pas modifié. (RUTHERFORD, ouvrage cité.)

ment, constituerait la radioactivité. Un atome ordinaire serait formé de systèmes d'électrons négatifs en rotation très rapide autour d'un centre positif ou à l'intérieur d'une sphère de fluide positif. Par suite de la rotation seule, ces électrons perdraient lentement leur énergie, rayonnée au cours des âges dans l'éther universel. C'est cette perte d'énergie qui rendrait peu à peu instables des combinaisons stables auparavant: une toupie en rotation cesse d'être en équilibre dès que sa vitesse angulaire descend au-dessous d'une certaine limite. Et la période d'instabilité s'accompagne d'une dislocation plus ou moins profonde du système, dislocation qui dans le cas de l'atome constitue la radioactivité[1].

De plus, les atomes actuels se seraient formés petit à petit par l'agrégation d'éléments plus simples, de moindre énergie interne, au fur et à mesure que ceux-ci perdraient leur énergie. L'énormité de l'énergie intra-atomique donne à penser que, si cette théorie de l'évolution inorganique est exacte, les pertes par radiation ont dû être elles-mêmes considérables et ont pu servir à alimenter dans une forte proportion le rayonnement solaire.

12. — La perte d'énergie par radiation continue, que subissent probablement les atomes matériels, est d'une lenteur d'autant plus grande que dans chaque atome les électrons en rotation sont plus nombreux[2]. Mais il est possible que l'influence de la température sur ce

[1] Il est important de remarquer que, dans cette théorie, ce n'est pas la radiation atomique elle-même qui produit la radioactivité, mais bien les bouleversements qui en sont la conséquence.

[2] J.-J. Thomson, *Electricity and Matter*, p. 105.

phénomène soit considérable, ce qui, nous l'avons dit, ne semble pas être le cas lorsqu'il s'agit de la radio-activité proprement dite.

13. — Les théories que nous venons d'exposer, bien qu'à peine nées pour ainsi dire, permettent donc, on le comprend, d'accroître dans des proportions inconnues, mais sûrement considérables, la provision d'énergie que nous pouvons attribuer au Soleil. Nous voyons ainsi se prolonger très loin en arrière la genèse des Soleils et des mondes; de même leur avenir cesse d'être aussi étroitement limité que le voulait la théorie de *Helmholtz*. Les astronomes peuvent donc accorder sans difficulté aux géologues les périodes énormes dont ceux-ci ont besoin pour expliquer les transformations de la nature.

CHAPITRE IV

ÉQUILIBRE DYNAMIQUE ET THERMIQUE DU SOLEIL.

GÉNÉRALITÉS

1. — On admet aujourd'hui universellement, et nous n'insisterons guère sur ce point déjà établi au cours d'un chapitre précédent[1], que la masse solaire ne peut être solide. Si, d'ailleurs, elle avait pu l'être à l'origine, et si à un moment donné une cause inconnue l'avait rendue incandescente, elle n'aurait pas tardé à se refroidir au bout de peu de temps, car une matière solide, quelle qu'elle soit, ne saurait transmettre suffisamment la chaleur pour l'amener assez vite de l'intérieur à la surface et empêcher ainsi le refroidissement. En outre, les hautes températures, — de plus de 5 000°, — que les travaux modernes conduisent, comme nous l'avons vu, à attribuer au Soleil, s'opposent à ce que la matière puisse y demeurer à l'état solide: tous les corps connus fondent et même se volatilisent fort au-dessous de 5 000°. Enfin la faible

[1] Voir notamment la théorie de Faye.

densité moyenne de l'astre (1,4 environ par rapport à l'eau) nous donne également à penser qu'il est encore à l'état gazeux.

Nous ne voulons pas dire par là que le Soleil ressemble nécessairement aux gaz que nous obtenons dans nos laboratoires : la chaleur énorme qui y est renfermée, et aussi les pressions considérables que la seule action de la gravité (vingt-sept fois plus forte que sur la terre) doit développer dans une pareille masse, ne permettraient pas une assimilation trop étroite. Mais les lois de Mariotte et de Gay-Lussac, ainsi que la loi de Dalton, sur les mélanges gazeux, doivent, selon toute probabilité, être satisfaites; et ces lois suffisent, au point de vue physique, à caractériser l'état gazeux. Nous les considérerons donc comme pouvant servir de définition aux gaz parfaits, les seuls que nous aurons le plus souvent à envisager.

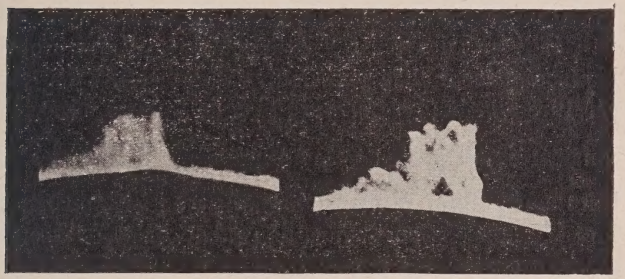
2. **Équilibre isothermique.** — Chaque point du Soleil doit alors posséder une pression, une température et une densité déterminées; de plus, les divers éléments du volume total s'attirent mutuellement en vertu de la loi de Newton. Dans ces conditions, un certain état d'équilibre s'établit à travers l'astre entier : quel est cet équilibre? Plusieurs savants ont cherché, à cette difficile question, une réponse admissible; mais avant d'étudier leurs travaux, il est nécessaire d'examiner d'un peu plus près la nature du régime qui peut ainsi prendre naissance.

Une masse gazeuse, abandonnée à elle-même, soustraite aux actions extérieures, — par suite, notamment, de l'éloignement extrême de toute cause perturbatrice,

— isolée de plus au point de vue calorifique, se place naturellement dans un certain état statique sous l'influence de l'attraction mutuelle de ses parties. Elle doit, par raison de symétrie, prendre une forme globulaire, la pression variant régulièrement du centre à la surface. En outre, si les courants intérieurs sont rendus impossibles, à cause de la viscosité, par exemple, les températures des différents points tendent à s'égaliser *par conduction* au bout d'un temps plus ou moins long : l'équilibre est alors *isothermique* et la température est finalement partout uniforme.

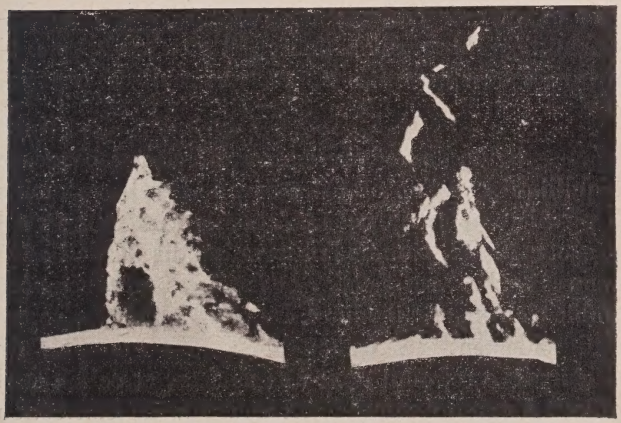
3. **Équilibre adiabatique.** — Les choses se passent différemment quand une cause quelconque agite sans cesse la masse entière, — soit que des éruptions violentes éclatent à intervalles rapprochés, soit que des tourbillons prennent naissance en produisant une sorte de brassage mécanique régulier. Chaque élément de volume, par le fait seul de son déplacement, change aussi de densité et de pression. Or nous savons que, si l'on comprime un gaz dans un récipient imperméable à la chaleur, le gaz s'échauffe; inversement la détente d'un gaz comprimé le refroidit. Par suite, chez un corps céleste gazeux *de conductibilité négligeable*, un élément matériel déterminé qui change de place change aussi de température, pour prendre celle correspondant à sa nouvelle position. A chaque point de la masse répondent ainsi une pression, une densité et une température bien définies par sa situation; on dit alors qu'il y a équilibre *convectif* ou *adiabatique*. Cet état d'équilibre n'est pas détruit par la circulation d'une partie de la matière à l'intérieur d'un tube

fermé sur lui-même; le moindre déplacement interne



1 — A $14^h,04^m$. 2 — A $16^h,27^m$.

A l'échelle employée, le diamètre de la Terre est de l'ordre de 1^{mm}.



3 — A $17^h,0^m$. 4 — A $17^h,40^m$.

Fig. 28. — Protubérance en mouvement rapide photographiée à Paris le 30 mai 1894 par M. Deslandres.

suffirait, au contraire, en vertu des principes que nous

venons de rappeler, à détruire un équilibre isothermique, une fois le régime permanent atteint.

Au point de vue mathématique, l'équilibre convectif est défini par les deux relations de Gay-Lussac et de Laplace. Soient p la pression, ρ la densité, t la température absolue en chaque point de la masse gazeuse considérée. Appelons γ le rapport $\frac{C}{c}$ des deux chaleurs spécifiques à pression et à volume constants, R et K étant des constantes dépendant de la nature du gaz. On a :

$$p = R\rho t \quad \text{(lois de Mariotte et de Gay-Lussac)},$$

$$p = K\rho^{\gamma} \quad \text{(loi de Laplace)}.$$

La seconde de ces relations caractérise plus spécialement l'équilibre adiabatique. Et l'on voit que si parmi les trois quantités p, ρ, t, une seule est connue, les deux autres sont déterminées.

4. — Selon toute vraisemblance, c'est à ce genre d'équilibre[1] que l'on a affaire dans le Soleil, au moins en première approximation. L'agitation intérieure y est en effet extrême, comme l'observation directe de l'astre avec ses taches, ses facules et aussi ses protubérances semble clairement l'indiquer. De plus, le Soleil rayonne continuellement au dehors d'énormes quantités de chaleur; il se refroidit donc à sa surface, et ce fait seul suffirait à rendre compte des courants de convection qui sans doute brassent la masse entière[2].

[1] Toutefois certains astronomes n'admettent pas la possibilité des courants de convection dans le Soleil (*d'Oppolzer, Brester, See,* entre autres). Mais l'opinion contraire prévaut actuellement.

[2] On n'a pas oublié d'ailleurs comment Laplace a montré que

Il est à remarquer que l'atmosphère terrestre nous fournit un exemple bien connu de phénomènes analogues. Pendant le jour, notre atmosphère absorbe une certaine quantité d'énergie calorifique solaire; mais elle en transmet à la terre une portion beaucoup plus grande. L'air s'échauffe donc davantage dans le voisinage du sol. Les couches supérieures de l'atmosphère, presque diathermanes, n'ayant guère changé de température, des courants s'établissent qui les ramènent alors, par suite de leur densité plus grande, à la surface du sol, tandis que des portions plus chaudes viennent prendre leur place. On a donc là une cause d'équilibre convectif. Il en est sans doute plus ou moins de même dans le Soleil[1].

la propagation dans l'air d'un ébranlement sonore est un phénomène adiabatique, — ce qui introduit, comme on sait, le rapport $\frac{C}{c}$ dans la formule de la vitesse du son. — Newton, en supposant le phénomène isothermique, était arrivé à un résultat inexact.

[1] M. Brillouin, dans une note des *Conférences et Allocutions*, de Sir W. Thomson (trad. Lugol, p. 241), fait remarquer que l'on pourrait tenir compte de la rotation du Soleil, ce qui modifierait un peu la nature de l'équilibre final. En effet, par suite de sa rotation, la masse doit se diviser en anneaux contigus plus ou moins nombreux. Or, en vertu de la loi des aires, les vitesses linéaires dans chaque anneau se distribuent en sens inverse de la distance à l'axe : les moments de rotation des divers éléments de volume ont en effet tendance à s'égaliser, ce qui a lieu quand la distribution précédente des vitesses se réalise. L'équilibre n'en est pas moins du type convectif; mais alors entre deux anneaux contigus il peut y avoir des différences assez considérables de vitesse linéaire, différences qui se traduisent par des frottements, des mouvements tourbillonnaires de même sens que la rotation générale, et en définitive par des dégagements locaux de chaleur (voir d'ailleurs plus loin la théorie d'*Emden*, p. 216).

THÉORIE DE HOMER LANE

1. **Problème théorique.** — C'est en 1870 que parut le remarquable travail de *J. Homer Lane*[1] sur l'équilibre intérieur du Soleil, mémoire que la plupart des géomètres considèrent encore aujourd'hui comme fondamental.

Lane admet d'abord, comme on le fait en général maintenant, la théorie de Helmholtz sur l'entretien de la chaleur solaire, par suite de la concentration graduelle de la masse. Il considère le Soleil comme un mélange de gaz plus ou moins transparents, analogue à l'air par exemple, en état d'équilibre convectif sous l'influence du refroidissement de la périphérie; il se propose alors de rechercher, en fonctions de la distance au centre, la loi des densités et celle des températures. Nous conserverons le plus souvent, dans notre exposition, les notations de l'auteur.

2. — Prenons comme unité de densité celle correspondant à l'unité de masse et à l'unité de volume; comme unité de force, la force de la pesanteur sur l'unité de masse; l'unité de pression étant la pression de l'unité de force sur l'unité de surface. Soient :

r la distance d'un élément de volume au centre, t sa température absolue, ρ sa densité, p sa pression; R et M étant le rayon et la masse de la Terre, m la masse de la portion du Soleil plus voisine du centre que l'élément considéré.

[1] *Amer. Journal*, 2e série, t. L, juillet 1870, p. 57.

On a, d'après la loi de Newton, f étant la constante de la gravitation :

$$dp = -f\frac{m\rho}{r^2}\,dr.$$

D'ailleurs :

$$p = \rho\sigma t$$

(σ étant une constante),

et

$$f\frac{M}{R^2} = 1$$

(d'après l'unité de force adoptée).

Nous avons donc l'équation

$$d(\rho\sigma t) = -\frac{mR^2}{Mr^2}\rho dr. \qquad (1)$$

En combinant les équations de la page 186, on obtient :

$$t = t_1\rho^{\gamma-1},$$

t_1 étant la valeur de la température absolue au point où $\rho = 1$.

L'équation (1) peut s'écrire dès lors :

$$\gamma\sigma t_1\rho^{\gamma-2}d\rho = -\frac{m}{M}\frac{R^2}{r^2}\,dr,$$

et en intégrant :

$$1-\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\gamma-1} = \frac{\gamma-1}{\gamma}\frac{R^2}{\sigma M t_1\rho_0^{\gamma-1}}\int_0^r\frac{mdr}{r^2}, \qquad (2)$$

ρ_0 étant la densité au centre du Soleil.

Comme :

$$m = 4\pi\int_0^r\rho r^2dr = 4\pi\rho_0\int_0^r\frac{\rho}{\rho_0}r^2dr, \qquad (3)$$

si l'on pose :

$$r = x\sqrt{\frac{\gamma\sigma M t_1}{4(\gamma-1)R^2\pi\rho_0{}^{2-\gamma}}}, \qquad (4)$$

il vient :

$$m = 4\pi\rho_0\left(\frac{\gamma\sigma M t_1}{4(\gamma-1)R^2\pi\rho_0{}^{2-\gamma}}\right)^{\frac{3}{2}}\mu, \qquad (5)$$

avec

$$\mu = \int_0^x \frac{\rho}{\rho_0}x^2dx. \qquad (6)$$

L'équation (2) se simplifie alors et devient :

$$1-\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\gamma-1} = \int\frac{\mu dx}{x^2}. \qquad (7)$$

3. — C'est cette équation que nous allons chercher à intégrer par approximations successives. Les équations (6) et (7) montrent que de γ seul dépendent : 1° la forme de la courbe des densités $\frac{\rho}{\rho_0} = f(x)$; 2° la valeur de la limite supérieure de x correspondant à $\frac{\rho}{\rho_0} = 0$; 3° la valeur correspondante de μ.

Proposons-nous de développer les fonctions μ et $1-\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\gamma-1}$ en séries ordonnées suivant les puissances croissantes de x. Quand $\frac{\rho}{\rho_0}$ est voisin de 1, c'est-à-dire dans le voisinage du centre, x est petit d'après (4), et $\mu = \frac{1}{3}x^3$ en intégrant (6). C'est le pre-

mier terme du développement de μ : en le portant dans (7), on a le premier terme de $1-\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\gamma-1}$, savoir $\frac{1}{6}x^2$. De l'équation :

$$1-\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\gamma-1}=\frac{1}{6}x^2,$$

tirons la valeur de $\frac{\rho}{\rho_0}$ et portons-la dans (6), nous aurons le second terme de μ. On introduira ensuite dans (7) la nouvelle valeur correspondante de μ, et en continuant de la sorte on obtiendra aisément les deux développements cherchés.

Ce sont : pour $\gamma=1{,}4$ (gaz diatomiques),

$$\mu=\frac{1}{3}x^3-\frac{1}{12}x^5+\frac{5}{336}x^7-\frac{125}{54432}x^9+\dots \quad (8)$$

$$1-\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{0,4}=\frac{1}{6}x^2-\frac{1}{48}x^4+\frac{5}{2016}x^6-\frac{125}{435456}x^8+\dots \quad (9)$$

et pour $\gamma=1{,}66$ (gaz monoatomiques).

$$\mu=\frac{1}{3}x^3-\frac{1}{20}x^5+\frac{1}{240}x^7-\frac{1}{3888}x^9+\dots \quad (10)$$

$$1-\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\frac{2}{3}}=\frac{1}{6}x^2-\frac{1}{80}x^4+\frac{1}{1440}x^6-\frac{1}{31104}x^8+\dots \quad (11)$$

Suivant que l'on considère le Soleil comme principalement formé de gaz diatomiques, ou de gaz mono-

atomiques, on emploiera dans les calculs l'un ou l'autre de ces deux groupes de séries.

4. — Les formules précédentes une fois établies, nous allons chercher à en déduire les véritables inconnues du problème ρ_0 et σt_1, qui nous donnent la densité et la température absolue au centre du Soleil (et partant en tous ses points). Appelons x' et μ' les valeurs de x et de μ correspondant à $\frac{\rho}{\rho_0} = 0$, c'est-à-dire aux confins de l'atmosphère solaire; d'après les équations (4) et (5) nous aurons, r' et m' étant le rayon et la masse de l'astre entier :

$$\rho_0 = \frac{m' x'^3}{4\pi \mu' r'^3}, \qquad \sigma t_1 = \frac{4\pi(\gamma - 1) R^2 r'^2 \rho_0^{2-\gamma}}{\gamma M x'^2}. \qquad (12)$$

Or les seconds membres de ces deux équations ne contiennent, en dehors de x' et μ', que des quantités physiquement ou astronomiquement connues. Et pour obtenir x' et μ', il suffit de résoudre par rapport à x et μ l'un ou l'autre des systèmes (8) et (9), ou (10) et (11), après y avoir fait préalablement $\frac{\rho}{\rho_0} = 0$. Le problème est alors théoriquement résolu.

5. **Résultats numériques.** — Pour tirer x' et μ' des séries (8) et (9), on n'a guère d'autre ressource que les approximations successives numériques : remplacer tour à tour x par 1; 1,1; 1,2; 1,3, etc., et arrêter les calculs dès que $\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\gamma-1}$ devient suffisamment petit. Par exemple, pour $\gamma = 1{,}4$ (cas des gaz

diatomiques ordinaires), l'auteur américain arrive aux résultats que voici :

Pour $x = 1$, les séries (8) et (9) donnent :

$$\mu = 0{,}2626, \quad \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{0.4} = 0{,}8520.$$

Après avoir essayé les valeurs $x = 1{,}2$; $1{,}4$, etc., on arrive, pour $x = 4{,}0$, à $\mu = 2{,}145$ et $\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{0.4} = 0{,}1378$.

Enfin[1] pour $x' = 5{,}355$, $\mu' = 2{,}188$ et $\frac{\rho}{\rho_0}$ est sensiblement nul. M. Homer Lane, admettant alors que la hauteur de l'atmosphère solaire au-dessus de la photosphère atteint le $1/22^e$ du rayon, suppose la densité moyenne du Soleil égale au $1/4$ de celle de la terre (5,5). Et il obtient finalement, à l'aide des formules (12) :

$$\rho_0 = 28{,}16.$$

La densité du Soleil en son centre serait donc supérieure de 30 % à celle du platine métallique, en partant de l'hypothèse où $\gamma = 1{,}4$.

Dans le cas où l'astre serait constitué par des gaz monoatomiques, $\gamma = 1{,}67$, et en employant des procédés analogues à ceux que nous venons d'indiquer, on trouve :

$$x' = 3{,}656, \qquad \mu' = 2{,}741, \qquad \frac{\rho}{\rho_0} = 0.$$

[1] Pour abréger les calculs, M. Lane se sert ici de formules approchées assez compliquées elles-mêmes et valables dès que $\frac{\rho}{\rho_0}$ est suffisamment petit : leur emploi serait, pour nous, sans intérêt.

Si l'on fait la même supposition que ci-dessus sur la hauteur de l'atmosphère solaire, il vient, au lieu de $\rho_0 = 28,16$:

$$\rho_0 = 7,11.$$

On voit l'influence considérable qu'a la valeur de $\frac{C}{c}$ sur la densité centrale. Les courbes représentant la densité et la température absolue en fonction de la distance au centre sont données par la figure 29.

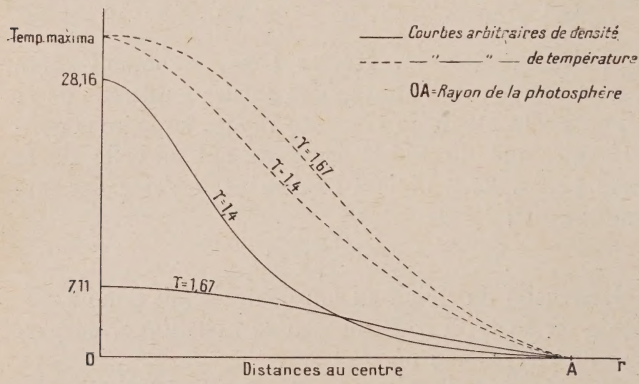


Fig. 29. — Courbes des densités et des températures en fonction de la distance au centre du Soleil.

6. — Les formules de M. Homer Lane lui permettent de calculer le produit σt, proportionnel, d'après la théorie cinétique des gaz, à la force vive de translation des molécules. Cette remarque fournit aussitôt une valeur de la vitesse des mouvements moléculaires dans le Soleil. Au centre, avec $\gamma = 1,4$, on trouve 612 kilomètres par seconde, et avec $\gamma = 1,67$, 533 kilomètres.

La plupart des corps que les recherches spectroscopiques révèlent dans le Soleil sont sur la terre polyatomiques, diatomiques principalement. Mais M. Lane fait remarquer qu'aux températures énormes qui règnent à l'intérieur du Soleil, les collisions des molécules doivent être assez violentes pour les disloquer : il y a donc de grandes chances pour que tous les gaz y soient à l'état monoatomique. Il en résulte que ce sont les chiffres correspondant à $\gamma = 1{,}67$ qui semblent les plus probables. Cette conclusion est aussi celle que l'on est, en général, porté à admettre aujourd'hui. Or si l'on connaît maintenant, et si l'on a pu étudier dans les laboratoires des gaz monoatomiques, il n'en était pas de même il y a trente-cinq ans; des raisonnements théoriques permettaient seuls de concevoir la matière sous un état moléculaire aussi simplifié. L'opinion de Homer Lane, que nous venons de citer, était donc pour ainsi dire en avance sur son temps; elle n'en est que plus intéressante.

MÉMOIRE DE SIR W. THOMSON

1. **Nouvelle solution du problème de Lane.** — *Sir W. Thomson* a étudié, en 1887[1], le problème traité par Homer Lane, en se plaçant à un point de vue un peu plus général; il a été ainsi conduit à des

[1] Sur l'équilibre d'un gaz sous l'action de la seule gravitation de ses parties, *Phil. Mag.*, janv., juill. 1887, 5e série, vol. XXIII, p. 287. — Le Mémoire ne s'applique pas uniquement, on le voit, au Soleil, bien que visiblement suggéré par lui. — Il convient d'insister sur ce point que Sir W. Thomson n'avait pas encore à cette époque eu connaissance du Mémoire de Homer Lane.

conclusions très intéressantes, concernant en particulier la physique cosmique.

L'illustre physicien anglais part des mêmes hypothèses que Lane; avec lui il considère comme établie la théorie de *Helmholtz*, et il admet que l'agitation naturelle causée par le refroidissement doit avoir pour effet de faire régner dans l'astre un état d'équilibre convectif.

Dans un but de généralisation, nous admettrons cette fois l'existence au centre de l'astre d'un noyau solide ou liquide de masse m_0 et de rayon a. On a alors, en conservant les mêmes notations que précédemment :

$$\frac{dp}{dr} = -\rho\left(m_0 + \int_a^r dr 4\pi r^2 \rho\right)\frac{f}{r^2},$$

ou

$$\frac{d}{dr}\left(\frac{r^2}{\rho}\frac{dp}{dr}\right) = -4\pi f r^2 \rho. \qquad (1)$$

D'ailleurs, en chaque point :

$$t = t_1 \rho^{\gamma - 1}, \qquad p = \rho\sigma t.$$

Et l'équation (1) peut s'écrire :

$$\frac{d}{dr}\left(r^2 \frac{d\rho^{\gamma-1}}{dr}\right) = -\frac{4\pi f(\gamma - 1) r^2 \rho}{\sigma t_1 \gamma}.$$

Posons :

$$\rho^{\gamma-1} = u, \qquad \frac{1}{\gamma - 1} = k, \qquad \frac{1}{r}\sqrt{\frac{\sigma t_1 \gamma}{4\pi f(\gamma - 1)}} = x,$$

l'équation précédente devient :

$$\frac{d^2u}{dx^2} = -\frac{u^k}{x^4}. \qquad (2)$$

2. — Cette équation différentielle, dont dépend tout le problème, ne saurait s'intégrer directement; supposons que nous en connaissions une solution particulière $f(x)$, nous aurons :

$$f''(x) = -\left[f(x)\right]^k x^{-4},$$

$$f''(mx) = -\left[f(mx)\right]^k m^{-4} x^{-4},$$

m étant un facteur constant quelconque.

Si donc l'on pose :

$$u = \mathrm{C} f(mx),$$

il vient : $$m^2 = \mathrm{C}^{-k+1}, \qquad (3)$$

et par suite $$u = \mathrm{C} f\left(x \mathrm{C}^{-\frac{1}{2}(k-1)}\right). \qquad (4)$$

Nous aurons ainsi formé une solution plus générale, renfermant une constante arbitraire C. Il est évident que la catégorie de solution qui nous intéresse le plus est celle pour laquelle la densité et la température absolue sont finies et continues, du centre à la périphérie. Si nous nous bornons à l'étude d'une masse gazeuse de dimensions limitées, la densité et la température absolue (et u avec elles) s'annulent à distance finie. Soit alors $u = f(x)$ une solution appartenant à cette catégorie, il en est de même de $u = \mathrm{C} f(mx)$, m ayant la valeur trouvée ci-dessus $\mathrm{C}^{\frac{-k+1}{2}}$. D'autre part, pour $x = 0$, c'est-à-dire à distance infinie, u doit être nécessairement nul : la solution que nous venons de trouver sera donc l'intégrale, convenant à la classe envisagée, et elle ne renfermera plus qu'une seule constante arbitraire C.

3. **Corollaires divers.** — On peut donc, dès maintenant, énoncer un certain nombre de propositions générales déduites de l'équation (4) et applicables à tous les astres gazeux de forme globulaire, — ce qui exclut *a priori* le cas des nébuleuses planes ou spirales comme celles d'Andromède ou des Chiens de chasse, mais s'applique bien au Soleil, surtout dans les premiers stades de son évolution gazeuse.

1°) Les diamètres des différents astres sphériques formés d'un même gaz sont en raison inverse des puissances $\frac{1}{2}(k-1)$, de leurs températures centrales aux époques où la température des points d'égale densité devient égale (c'est-à-dire aux instants où durant le refroidissement graduel t_1 prend la même valeur).

En effet, à la périphérie on a :

$$u = \mathrm{C}f\left[x\mathrm{C}^{-\frac{1}{2}(k-1)}\right] = 0.$$

Deux astres différents nous donneront donc l'équation

$$\frac{1}{r}\sqrt{\frac{\sigma t_1 \gamma}{4\pi f(\gamma-1)}}\,\mathrm{C}^{-\frac{1}{2}(k-1)} = \frac{1}{r'}\sqrt{\frac{\sigma t_1 \gamma}{4\pi f(\gamma-1)}}\,\mathrm{C}'^{-\frac{1}{2}(k-1)};$$

mais au centre

$$t = t_1\,\mathrm{C}f(\infty).$$

Comme t_1 est supposé le même pour les deux astres, t est proportionnel à C, et l'on voit aisément que les

rayons des deux astres sont en raison inverse de $t^{\frac{1}{2}(k-1)}$.

2°) Dans les mêmes conditions, c'est-à-dire, σ, γ et t_1 étant les mêmes pour plusieurs astres, les densités centrales de ceux-ci sont proportionnelles aux puissances k des températures centrales, ou encore en raison inverse des puissances $\frac{2}{2-\gamma}$ des diamètres.

3°) En conservant les mêmes hypothèses, les quantités de matière contenues dans les différents corps sont en raison inverse des puissances $\frac{2}{2-\gamma} - 3$, de leurs diamètres respectifs. Cela résulte de ce que la quantité de matière est proportionnelle à $r^3\rho$.

4°) Les diamètres de différents astres de même composition et de même densité au centre sont entre eux comme les racines carrées de leurs températures centrales.

Pour tous ces corps, la constante C est la même, en vertu de l'équation (4), et il n'y a qu'à se reporter à 1°).

5°) Les diamètres de plusieurs astres de même densité et de même température centrale, mais de compositions différentes, varient en raison inverse de leurs densités spécifiques.

Les constantes σ sont en effet inversement proportionnelles aux densités spécifiques des gaz correspondants.

6°) Enfin une courbe unique $y = \varphi\left(\frac{1}{r}\right)$ permet de connaître, pour une sphère en équilibre moléculaire et

formée d'un gaz donné, d'un diamètre donné, la loi de variation de la température absolue à une distance quelconque du centre. Une courbe analogue

$$y = \left[\varphi\left(\frac{1}{r}\right) \right]^k$$

donnerait la loi de distribution des densités.

4. **Calcul des fonctions inconnues.** — Il est possible d'obtenir avec la précision que l'on désire la solution particulière de l'équation (2) $\frac{d^2u}{dx^2} = -\frac{u^k}{x^4}$ pour laquelle

$$u = \mathrm{A}, \qquad \frac{du}{dx} = \mathrm{A}',$$

quand $x = a$, a étant un nombre quelconque.

On procède par approximations successives. Connaissant une valeur apprchée u_i de u, on en obtiendra une plus exacte u_{i+1} en intégrant deux fois l'équation (2). On aura ainsi :

$$u_{i+1} = \mathrm{A} + \int_a^x dx \left(\mathrm{A}' - \int_a^x \frac{u_i^k}{x^4} \right). \qquad (5)$$

Dans la pratique, on a besoin pour chaque valeur numérique de x de commencer le calcul par une valeur de u, numérique également, assez voisine de la valeur exacte. On pourra alors déduire d'une construction graphique un nombre u_0 suffisamment précis. La suivante a donné d'excellents résultats.

Au point M du plan ayant pour coordonnées rectangulaires $x = a$, $u = \mathrm{A}$, on construit le cercle oscula-

teur de l'intégrale cherchée en calculant son rayon : on connaît en effet $\left(\frac{du}{dx}\right)_a = A'$ et $\left(\frac{d^2u}{dx^2}\right)_a = -\frac{A^k}{a^k}$. Puis sur ce cercle osculateur on prend un point M′ peu éloigné de M, et l'on calcule pour ce point un nouveau cercle de courbure au moyen de la tangente au premier cercle et de la dérivée seconde fournie par l'équation (2). Sur le nouveau cercle osculateur en M′, on prend un point M″ voisin de M′, et l'on continue pour ce point la même série d'opérations, etc. Une fois obtenue la valeur cherchée de u_0, on la corrige ensuite par calculs successifs à l'aide de la formule (5).

Il est à remarquer que $\frac{du}{dx}$ représente, à un facteur constant près, la masse m intérieure au point considéré. Celle-ci a en effet pour valeur :

$$m = \int_0^r 4\pi r^2 \rho dr.$$

Mais $$dx = -\frac{1}{r^2} dr \sqrt{\frac{\sigma t_1 \gamma}{4\pi f(\gamma - 1)}}.$$

Donc $$m = \int_x^\infty 4\pi r^4 \rho \left[\frac{\sigma t_1 \gamma}{4\pi f(\gamma - 1)}\right]^{-\frac{1}{2}} dx,$$

$$= \int_x^\infty 4\pi \frac{u^k}{x^4} \left[\frac{\sigma t_1 \gamma}{4\pi f(\gamma - 1)}\right]^{\frac{3}{2}} dx,$$

et $$m = 4\pi \left(\frac{\sigma t_1 \gamma}{4\pi f(\gamma - 1)}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{du}{dx},$$

puisque pour

$$x = \infty, \quad \frac{du}{dx} = 0.$$

5. — Sir W. Thomson donne le tableau des valeurs u calculées selon la méthode indiquée en partant de

$$u = 16, \quad \frac{du}{dx} = 0, \quad \text{pour} \quad x = \infty \quad \text{(au centre)}.$$

L'auteur suppose $\gamma = 1{,}4$. Nous citerons quelques uns de ses chiffres :

r	$x = \frac{1}{r}$	TEMP. u,	DENSITÉ $u^{2{,}5}$,	MASSE INTÉRIEURE.
0	∞	16,00	1024,0	0,00
0,100	10	14,46	795,2	0,28
0,200	5	10,92	394,1	1,57
0,500	2	2,25	7,6	4,37
0,667	1,5	0	0	4,49

Ce tableau permet de se rendre compte que la densité centrale est 22,5 fois plus forte que la densité moyenne, résultat qui revient à attribuer une densité de $22{,}5 \times 1{,}4 = 31{,}5$ aux régions centrales du Soleil.

RECHERCHES DE M. T. J. J. SEE

1. — **Températures et pressions théoriques à l'intérieur du Soleil.** — Tout dernièrement[1], un astronome américain a repris le problème de l'équilibre intérieur des corps célestes, en partant le plus souvent des mêmes prémisses que les auteurs précédents :

[1] *Astr. Nach.*, n° 4053, vol. 169, 1905, p. 321 : Researches on the physical constitution of the heavenly bodies. Voir aussi le n° 3992 du même journal, vol. 167, 1905, p. 113.

il a, en particulier, suivi presque pas à pas le mémoire de Lane, dont il a soigneusement revu et vérifié les calculs.

M. See regarde le Soleil comme un mélange intime de corps simples différents, dissociés et réduits par l'action de la haute température à l'état monoatomique : tous ses calculs sont faits dans cette hypothèse, en choisissant une fois pour toutes $\gamma = 1{,}66$: on se rappelle d'ailleurs que c'était là le cas auquel Homer Lane attribuait le plus de vraisemblance. Toutefois, à la surface de la photosphère, mettons par exemple à une profondeur de $\frac{1}{10}$ du rayon, il peut, selon M. See, y avoir recombinaison plus ou moins accentuée des atomes : γ doit alors graduellement passer de 1,66 à 1,4.

Nous avons vu que Lane avait trouvé, pour la densité centrale, dans l'hypothèse monaotomique, une valeur de 28,16, ce qui représente 23,40 fois la densité moyenne[1] : il est à remarquer que ce chiffre est fort voisin de celui 22,5 obtenu par *Sir W. Thomson*. *Ritter*[2] qui, par une méthode d'approximations successives fondée sur des principes analogues, a traité la même question en 1878, trouvait 23. L'accord des diverses méthodes est donc satisfaisant, et il n'est guère à craindre qu'elles donnent lieu à des erreurs notables.

2. — L'exactitude théorique de la marche adoptée par *Homer Lane* se trouve, dans la pratique, quelque

[1] La densité moyenne doit ici faire intervenir l'atmosphère solaire, ce qui explique le résultat un peu différent de Lane dans son Mémoire.

[2] *Wiedemanns Annalen*, t. V, p. 554, 1878. Voir aussi *Astroph. Journal*, t. VIII, 1898.

peu amoindrie par les erreurs de ses approximations ; aussi est-il préférable de reprendre le calcul direct des séries en poussant jusqu'aux degrés élevés de la variable x. Pour trouver la limite supérieure de l'atmosphère solaire, See cherche la valeur de x pour laquelle la série $\frac{\rho}{\rho_0}$ s'annule, et arrive à

$$x' = 3{,}653962, \qquad \mu' = 2{,}709091,$$

en tenant compte des 20 premiers termes ; tandis que Lane obtenait respectivement 3,656 et 2,741. En appelant ρ_1 la densité moyenne de l'astre, cette rectification donne au rapport $\frac{\rho_0}{\rho_1}$ la valeur ronde 6,000[1]. et si l'on prend $\rho_1 = 1{,}4026$, on en conclut pour la densité centrale :

$$\rho_0 = 8{,}417,$$

ce qui donne du même coup les densités correspondant aux diverses valeurs de x.

3. — Ces données fondamentales une fois connues, M. See calcule la température centrale en se plaçant dans deux hypothèses : celle où la température superficielle serait de 6000° et celle ou elle serait de 12000° : on peut en effet admettre que la température du Soleil à la surface, certainement supérieure à la température effective, est presque sûrement comprise entre ces deux chiffres. Quant à la densité de la matière solaire au voisinage de la surface, See la suppose comprise entre $\frac{1}{10}$ et $\frac{1}{100}$ de celle de l'atmosphère ter-

[1] Voir p. 192 (1re équation 12).

restre. Ce n'est là, bien entendu, qu'une estimation d'ordre de grandeur : elle repose sur ce fait que cette densité correspond à la région où les nuages cessent de se former. Il n'y a d'ailleurs pas de limite réelle à l'atmosphère solaire, comme l'existence de la couronne suffirait à le prouver, la brusque transition qui se produit au niveau de la photosphère n'étant due qu'à l'énormité de la pesanteur solaire.

Les deux hypothèses faites sur la température et sur la densité superficielles permettent aisément de calculer la température centrale à l'aide de la formule

$$T = T' \left(\frac{\rho}{\rho'} \right)^{\frac{2}{3}},$$

ρ étant, comme on l'a vu, égal à 8,417.

On voit donc qu'en admettant

$$T' = 6000^\circ \quad \text{et} \quad \rho' = 0{,}1,$$

on obtiendra une limite inférieure des températures internes, tandis qu'avec $T' = 12000$, $\rho' = 0{,}01$, on aura leur limite supérieure, et il est vraisemblable que la réalité est intermédiaire entre ces deux cas extrêmes. M. See en arrive donc à présenter le tableau suivant, que nous reproduisons à titre de curiosité (voir p. 206) : on voit que, dans la région centrale, il obtient une pression de l'ordre de 10 milliards d'atmosphères et une température comprise entre 10 et 100 millions de degrés. Il ne faudrait pas croire toutefois que le plus modéré de ces deux chiffres est, *a priori*, le plus voisin de la vérité : après avoir, en effet, attribué à la température superficielle du Soleil des valeurs exorbitantes, on est maintenant tenté, par

PRESSIONS ET TEMPÉRATURES INTÉRIEURES
DU SOLEIL DANS L'HYPOTHÈSE MONOATOMIQUE
(d'après T. J. J. See).

R (dist. au centre) en parties du rayon	P (pression) en atmosphères [1]	T (température)	
		1° $T' = 6000°$ C $\rho' = \frac{1}{10}$	2° $T' = 12000°$ C $\rho' = \frac{1}{100}$
1,00	—	6000° C	12000° C
0,95	3376805	379212	3520293
0,90	21636565	797912	7407160
0,70	536137160	2878659	26723100
0,50	2639437700	5446090	50556970
0,30	6759055500	7932940	73642880
0,10	10607851000	9500156	88191620
0,00	11215403000	9714170	90178370

une exagération inverse, de la réduire de plus en plus, et une température de 12000° à la surface est peut-être plus probable qu'on ne le croit généralement.

4. « **Chaleur spécifique moyenne.** » — Au sujet de l'état de la matière dans le Soleil, M. See a, nous l'avons vu, pris position. En faveur de la dissociation générale il fait, outre les raisons que nous avons indiquées, ressortir que les recherches récentes ont révélé l'instabilité des corps de fort poids atomique (radium, uranium, etc). Puisque le radium se transforme lentement sur la terre en hélium, il doit se

[1] Le mémoire des *A. N.*, nº 4053, p. 331, comporte ici un erratum (voir *A. N.*, nº 4104, p. 386-388).

décomposer plus vite encore[1] dans le Soleil, si seulement il peut y prendre naissance : il est donc très probable que les molécules les plus complexes ont, dans le Soleil, cédé la place à leurs plus simples constituants.

5. — De ce retour de la matière à l'état monoatomique, ne pourrait-on pas déduire quelque chose sur la chaleur spécifique moyenne de l'astre entier? M. See l'a pensé non sans hardiesse : Admettons en effet que la loi de *Dulong et Petit* continue à être vérifiée dans le Soleil : elle nous apprend que la chaleur spécifique d'un corps est égale au quotient du nombre 6,8 par le poids moléculaire[2]. Il s'ensuit que si les éléments primitifs de l'intérieur de l'astre ont un poids moléculaire moyen inférieur à 6,8, la chaleur spécifique moyenne résultante doit être supérieure à celle de l'eau. Ce serait 1,6 dans le cas de l'hélium, 3,4 dans celui de l'hydrogène ; or il semble très probable que la dissociation soit de plus en plus accentuée au fur et à mesure que l'on s'enfonce à de plus grandes profondeurs (c'est là, du moins, l'opinion de *Newcomb*) ; on peut donc admettre que la chaleur spécifique moyenne du Soleil doit être comprise entre 0,5 et 6,8.

M. See applique ce résultat au calcul, assez labo-

[1] Remarquons que les expériences faites jusqu'ici n'ont pas paru montrer que la radioactivité augmentât sensiblement avec la température. Mais peut-être n'a-t-on pas poussé les recherches assez loin.

[2] On voit comment M. See définit la chaleur spécifique moyenne du Soleil : la moyenne des chaleurs spécifiques des éléments constituants, chaleurs définies elles-mêmes par la loi de Dulong et Petit.

rieux, de la quantité de chaleur emmagasinée dans le Soleil. Il arrive à cette conclusion que, si l'on admet pour la température superficielle le chiffre de 6000°, pour la densité à la surface celui de 0,1, le stock minimum d'énergie calorifique du Soleil suffirait pour élever de 20 millions de degrés une masse d'eau égale, c'est-à-dire, au taux actuel de la déperdition annuelle, pour entretenir encore le rayonnement solaire pendant 10 millions d'années.

Comme M. See admet, avec Lord Kelvin, que le rétrécissement progressif de Helmholtz, conforme à l'hypothèse de Laplace, doit effectivement avoir lieu au moins jusqu'à ce que le diamètre solaire ait diminué de moitié, on peut, dans son opinion, accepter le chiffre de 30 millions d'années pour la durée à venir de notre Soleil. Nous n'entrerons pas dans le détail de ce calcul; il est du reste d'accord avec ceux obtenus par d'autres méthodes, au moins en excluant les phénomènes intra-atomiques.

6. **Intervention de la viscosité.** — Une autre question intéressante, est celle de la vitesse que peuvent avoir les molécules du Soleil supposé gazeux aux températures qui y règnent. Lane avait déjà fait cette estimation, et il avait trouvé pour le centre 533 kilomètres. M. See arrive à 554 kilomètres, avec des données plus exactes, et, complétant les calculs, il indique une vitesse à la surface de $9^{km},3$ par seconde et de $106^{km},6$ à une profondeur de $\frac{1}{20}$ du rayon.

On voit donc que si, près de la surface, les molécules ont des vitesses bien inférieures à la vitesse cri-

tique, c'est-à-dire à la vitesse passé laquelle un mobile n'est plus retenu par l'attraction de l'astre, au centre il n'en est plus de même[1], et les molécules doivent, en l'absence d'autres forces, s'échapper dans l'espace pour ne plus revenir. Cette désagrégation de la masse entière ne saurait être empêchée que par la viscosité sans laquelle le Soleil ne tarderait pas à s'évaporer rapidement.

Nous en arrivons ainsi naturellement à nous demander quelle peut bien être, dans un corps comme le Soleil, l'intervention des forces élastiques. Mais la seule influence de la gravité solaire, en comprimant les unes sur les autres les couches successives, doit produire des effets comparables à la rigidité d'une barre d'acier. De même qu'un morceau d'acier, quand on le comprime ou quand on l'étire, résiste en quelque sorte à la déformation que l'on cherche à lui imposer, de même les pressions régnant à l'intérieur d'un corps céleste doivent s'opposer aux changements de forme que pourraient lui faire subir des forces extérieures[2].

7. **Rigidité solaire.** — Nous prenons pour définition du coefficient d'élasticité celle usuelle bien connue[3] : le coeficient d'élasticité d'une substance isotrope est égal au quotient de la traction imposée normalement à l'unité de surface par l'allongement relatif observé dans la direction de cette force. Dans ses appli-

[1] La vitesse critique est, à la surface, de 612 kilomètres, mais à l'intérieur du Soleil la force attractive diminue, puisqu'elle devient proportionnelle à la distance au centre.

[2] Telles que les marées, par exemple.

[3] Article « Elasticity » de l'*Encyclopædia Britannica*.

cations aux corps célestes, M. See est bien obligé de définir la « rigidité » un peu différemment, afin de n'y faire entrer que des quantités connaissables.

Soit p la pression à une distance x du centre, x' étant le rayon maximum de l'astre : sur toute la couche x s'exercera une pression égale à

$$4\pi x^2 p.$$

Dès lors l'expression $R = \dfrac{\int_0^{x'} p \cdot 4\pi x^2 dx}{\int_0^{x'} 4\pi x^2 dx}$ représente la pression moyenne régnant dans les différentes couches, chaque couche étant considérée individuellement. On peut donc écrire :

$$R = \frac{\int_0^{x'} p 4\pi x^2 dx}{\frac{4}{3}\pi x'^3}.$$

Cette définition revient, au fond, à celle de tout à l'heure. Quand une barre de fer de section S est étirée dans le sens de sa longueur l par un poids P (exprimé en dynes), le coefficient d'élasticité R peut s'écrire en effet :

$$R = \frac{P}{S} : \frac{dl}{l}.$$

De même, dans le cas des gaz, v étant le volume du fluide renfermé dans un corps de pompe à piston mobile, on a pour un accroissement de volume dv :

$$dv = -\frac{v}{R} dp.$$

Mais la loi de Mariotte donne $pdv + vdp = 0$; on en

conclut $R = p$. Tout se ramène donc à calculer la pression moyenne : c'est ce que fait M. See en considérant, ainsi que nous le savons, les corps célestes comme gazeux : l'élasticité de ces corps est alors uniquement due à leurs pressions internes.

8. — Ces préliminaires posés, appelons G l'accélération de la gravité solaire dans une des couches concentriques ; on aura évidemment, pour une sphère gazeuse : $dp = -\rho G dx$.

On a aussi, G′ étant la gravité due au Soleil tout entier :

$$\frac{G}{G'} = \frac{\frac{1}{x^2}}{\frac{4}{3}\pi\rho_1 x'} \int_0^x 4\pi x^2 \rho dx = \frac{3\rho_0}{x' x^2 \rho_1} \mu$$

(notation de Lane). On en déduit G et partant p.

On voit donc qu'il est facile de calculer R en partant des constantes et des fonctions de la théorie de Homer Lane.

Les calculs une fois effectués, M. See trouve pour valeur de la rigidité moyenne des couches du Soleil :

$$R = 2027861\,500 \text{ atmosphères},$$

soit plus de 2000 fois celle de l'acier au nickel[1].

Cela veut dire que le globe solaire, en tenant compte de toutes les couches qui le composent, résisterait à

[1] Ce chiffre, donné par M. See, est comparé par lui, non pas proprement au module d'élasticité, mais à celui de « glissement », relié au premier par une formule simple. Pour plus de détails, nous renverrons au mémoire original.

une déformation extérieure 2000 fois mieux que s'il était en acier-nickel. On doit évidemment supposer ici que les diverses parties de la sphère d'acier-nickel comparée au Soleil sont aussi complètement dénuées d'attraction mutuelle que celles des échantillons de nos laboratoires d'essais. Alors que le Soleil emprunte uniquement aux forces de gravitation sa rigidité, une barre d'acier doit, en fait, la sienne à la cohésion moléculaire, cohésion que nous n'avons pas envisagée ici.

On pourrait appliquer les raisonnements précédents à une masse quelconque de gaz monoatomiques en équilibre stable. Ainsi, tandis que les étoiles offrent sans doute une résistance considérable aux effets de marées, les nébuleuses en opposent vraisemblablement fort peu. La rigidité moyenne varie en effet, on le voit aisément, en raison inverse de la 4e puissance du rayon extérieur, toutes choses égales par ailleurs. Le coefficient d'élasticité de la nébuleuse solaire, au temps où elle s'étendait jusqu'à la terre, ne devait être, par suite, que le $\frac{1}{215^4}$ de celui du Soleil actuel, soit 1 atmosphère. M. See peut pareillement étendre ses résultats aux planètes, en les supposant toujours, il est vrai, à l'état monoatomique. Il trouve notamment, pour Jupiter : $R = 18\,691\,000$ atmosphères, et pour Saturne : $R = 3\,000\,000$.

9. — A la vérité, dans tous les calculs de rigidités indiqués plus haut, nous n'avons pas tenu compte de l'augmentation de la densité avec la profondeur : c'est la rigidité moyenne des couches que nous avons obtenue et non pas la rigidité moyenne de la *matière*

solaire. Cette dernière est définie par la relation :

$$R' = \frac{\int_0^x 4\pi x^2 \rho p dx}{\frac{4\pi}{3} \rho_1 x'^3}.$$

Son calcul est tout à fait analogue à celui déjà vu : on trouve pour le Soleil 6 106 430 000 atmosphères, soit 6000 fois la rigidité de l'acier-nickel des plaques de blindage. D'une façon générale, les résultats sont, à très peu de chose près, triples de ceux obtenus précédemment. On peut d'ailleurs les étendre aux autres corps célestes.

10. **Ténacité**. — A côté de la rigidité reliée au module d'élasticité, on peut aussi envisager la ténacité, ou force de rupture. On sait en effet que, si l'on soumet à une traction croissante un fil métallique, non seulement il s'allonge plus ou moins, selon son élasticité, mais encore il arrive un moment ou l'échantillon casse tout à fait : la tension par unité de surface à laquelle la rupture se produit mesure par définition la ténacité du métal. S'il s'agit d'un corps céleste, nous pouvons calculer sa ténacité en le supposant fluide et soumis à des forces qui tendent à amener une rupture suivant un plan diamétral; il suffit alors de chercher dans une telle section la pression moyenne due à la gravitation.

Dans une couronne infiniment étroite d'un plan diamétral la pression totale atteint :

$$p \cdot 2\pi x dx,$$

ce qui donne pour le grand cercle entier

$$P = 2\pi \int_0^{x'} px\,dx.$$

Le calcul fait par approximations succesives nous donnera la ténacité moyenne de l'astre étudié. On trouve ainsi, par exemple :

Pour le Soleil 1919738000 atmosphères; pour Jupiter 17664880 et pour la Terre 1068188.

Comme point de comparaison, disons que la ténacité de l'acier-nickel est de 300000 atmosphères pour le fil « corde de piano »; pour le grès rouge elle n'est que de 40.

11. — On voit qu'ici encore les corps célestes, abstraction faite des actions moléculaires, nous conduisent à des chiffres énormes. On en pourrait conclure qu'il est extrêmement difficile d'imaginer des conditions physiques qui pourraient mettre en danger la stabilité intérieure d'une planète ou d'une étoile de dimensions un peu considérables. Seule une violente collision avec un autre corps de grosseur comparable parviendrait à amener une pareille catastrophe. Cette remarque nous montre le peu de vraisemblance de l'hypothèse jadis imaginée par *Olbers* pour expliquer les astéroïdes : celle de l'éclatement d'une planète. L'éclatement ne saurait, en tout cas, semble-t-il, avoir été spontané.

12. **Conséquences variées.** — Toutes ces recherches comportent en outre, d'après See, une conclusion plus importante encore au point de vue de la physique solaire : il devient difficile selon lui d'admettre les courants de convection profonds, nécessités par tant

de théories. On ne peut guère imaginer, en effet, que, dans une masse soumise aux pressions internes que nous avons vues et d'une rigidité supérieure de plusieurs milliers de fois à celle de l'acier le plus dur, des mouvements convectifs puissent s'établir ; si même ils pouvaient prendre naissance, ils ne sauraient durer un temps appréciable, en raison des frottements énormes que la moindre circulation de matière produit inévitablement dans de telles conditions. Tous les courants observés ou observables doivent donc être superficiels et limités aux régions où la pression est suffisamment faible pour les rendre possibles.

Mais si nous devons renoncer aux courants de convection, comment expliquerons-nous l'entretien de la radiation solaire? M. See pense que le rayonnement direct des couches internes doit pouvoir parvenir à la surface sans courants matériels verticaux, par le seul mécanisme des ondulations lumineuses. Les gaz des régions extérieures du globe solaire sont assez raréfiés pour avoir un pouvoir émissif intense, — comme ceux de nos tubes de Geissler, — et cela ne les empêche pas de rester parfaitement transparents pour les autres sources de lumière. Pourquoi n'en serait-il pas de même aux plus grandes profondeurs? La vitesse de propagation de l'énergie au sein de la masse solaire ne doit pas être de beaucoup inférieure à celle de la lumière dans nos expériences terrestres. Et M. See compare la pénétration des rayons du Soleil dans notre atmosphère à celle qui doit avoir lieu dans les couches externes du Soleil lui-même. En tout cas, quoi qu'il faille penser de cette explication, elle a du moins le mérite de ne pas faire intervenir des courants plus dif-

ficiles à imaginer encore, si l'on admet les objections précédentes.

13. — Une autre conséquence que l'on peut tirer de la rigidité solaire est relative à la séparation des éléments chimiques de l'intérieur des corps célestes. M. Schuster, qui a soutenu certaines des idées émises par M. See et l'a même précédé dans cette voie, admet qu'il peut y avoir séparation bien tranchée entre les divers éléments d'un astre. C'est ainsi que la densité centrale du Soleil étant probablement voisine de celle du fer, d'après Lane, M. *Schuster* ne serait pas éloigné de croire le centre du Soleil formé de vapeur de fer monoatomique. Un autre fait du même genre plaiderait, dans sa pensée, en faveur de cette opinion : la densité du centre de la terre, calculée d'une façon analogue, est aussi très voisine de celle du fer solide, et les propriétés magnétiques connues de notre globe cadreraient assez bien avec un noyau terrestre ferrugineux.

M. See ne croit cependant pas ces inductions justifiées : la grande rigidité que le calcul conduit à attribuer aux corps célestes empêcherait, selon lui, toute séparation des éléments d'après leurs poids atomiques. Aussi le Soleil doit-il plutôt être un mélange intime de gaz différents, et la répartition de la matière en couches chimiquement distinctes est-elle peu vraisemblable.

THÉORIE D'EMDEN

1. **Hypothèses fondamentales**. — Cette théorie a été adoptée, surtout en Allemagne et en Hollande, par un certain nombre d'astronomes qui l'ont

d'ailleurs plus ou moins remaniée : on peut donc la regarder comme l'une des doctrines à l'ordre du jour actuellement; aussi entrerons-nous à son sujet dans quelques détails.

Avec tout le monde, *M. Emden*[1] traite le Soleil comme une masse fluide en rotation, vraisemblablement gazeuse et dans le sein de laquelle il suppose que des courants peuvent se produire. La conductibilité que l'on peut raisonnablement attribuer au Soleil étant trop faible pour transporter à la surface des quantités notables de chaleur, il est en effet, selon M. Emden, nécessaire de faire appel aux courants de convection afin d'expliquer le rayonnement continu de l'astre. A mesure que par le refroidissement le fluide devient plus dense, il tend à se rapprocher du centre, tandis que des matières plus chaudes aspirent à monter : on reconnaît là la théorie de *Helmholtz* et de *Lord Kelvin*. Cependant, bien que Emden se soit largement inspiré de ces deux grands physiciens, du premier surtout, il n'admet pas que les courants ascendants et descendants puissent être radiaux et entièrement symétriques par rapport au centre ; il en serait bien ainsi si le Soleil ne tournait pas, mais la rotation donne au phénomène, comme nous allons le voir, un tout autre caractère.

2. **Les surfaces de discontinuité**. — Nous supposerons le Soleil sphérique, la théorie s'appliquerait d'ailleurs aisément au cas d'un ellipsoïde de révolution. L'astre pourrait aussi posséder un noyau solide :

[1] *Annalen der Physik,* Band VII, Heft 1, 4e série, p. 176, 1902. On peut consulter aussi l'ouvrage récent d'Emden : *Gaskugeln*, Leipzig, 1907, B. G. Teubner.

il suffirait que ce noyau soit entouré d'une couche fluide relativement épaisse, ce qui est certainement le cas. Enfin nous supposerons encore que le Soleil est gazeux et que les relations caractéristiques des gaz en équilibre adiabatique lui sont applicables. Nous ne tiendrons pas compte du frottement et nous nous limiterons au cas du régime permanent.

Il est d'abord évident que les surfaces de niveau seront de révolution autour de l'axe de rotation. Les masses refroidies conserveront leur moment de rotation ainsi que leur chaleur interne[1] en se rapprochant du centre, et il en sera de même des matières chaudes ascendantes : nous aurons donc affaire à des masses gazeuses de densités et d'énergies calorifiques différentes et aussi de vitesses inégales, qui en un point quelconque de l'intérieur du Soleil pourront donner naissance à des surfaces de discontinuité. Ces surfaces devront éprouver sur leurs deux faces des pressions égales, faute de quoi elles ne sauraient subsister : nous nous proposons, dans ce qui suit, d'étudier leur forme générale.

3. — Appelons R la distance au centre d'un point du Soleil, r sa distance à l'axe de rotation; nous aurons pour l'unité de masse, ω étant la vitesse angulaire, un moment de rotation Ω avec l'équation

$$\Omega = \omega r^2.$$

Soient p et ρ la pression et la densité, X, Y, Z, u, v, w les composantes des accélérations et des vitesses au

[1] La conservation du moment de rotation dans chaque élément d'un courant résulte du principe des aires. — La conservation de la chaleur interne est une conséquence de ce que les changements d'état sont supposés adiabatiques.

point considéré. Les équations ordinaires de l'hydrodynamique seront satisfaites et l'on aura :

$$\begin{cases} X - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial t} - u\frac{\partial u}{\partial x} - v\frac{\partial u}{\partial y} - w\frac{\partial u}{\partial z} = 0, \\ Y - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial t} - u\frac{\partial v}{\partial x} - v\frac{\partial v}{\partial y} - w\frac{\partial v}{\partial z} = 0, \\ Z - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial t} - u\frac{\partial w}{\partial x} - v\frac{\partial w}{\partial y} - w\frac{\partial w}{\partial z} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0. \quad (2)$$

Nous supposerons les axes dirigés comme d'après la figure (30), c'est-à-dire conformément aux usages astronomiques, l'axe des x étant l'axe de rotation.

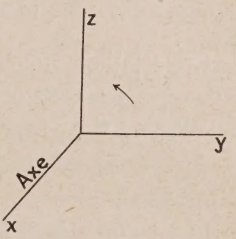


Fig. 30.

Les forces effectives X, Y, Z proviennent de la gravitation solaire; elles dérivent d'un potentiel V et l'on a :

$$X = -\frac{\partial V}{\partial x}, \qquad Y = -\frac{\partial V}{\partial y}, \qquad Z = -\frac{\partial V}{\partial z},$$

avec :

$$V = -4\pi\left(\frac{1}{R}\int_0^R \rho R^2 dR + \int_R^{\frac{D}{2}} \rho R dR\right),$$

D étant le diamètre solaire.

Il est facile de démontrer, en effet, que, pour un point intérieur d'une sphère homogène, le potentiel se compose de deux parties : l'une, due aux couches plus

voisines du centre, est la même que si ces couches avaient leurs masses réunies en ce dernier point et donne la première intégrale[1]; l'autre, due aux couches plus éloignées, est constante dans toute la région qui comprend le centre, et pour le centre en particulier peut se calculer aisément : on obtient alors la seconde intégrale.

D'ailleurs, d'après les axes choisis, on a :

$$u = 0,$$

$$v = -\omega z = -\frac{\Omega}{r^2} z,$$

$$w = \omega y = \frac{\Omega}{r^2} y.$$

Ces relations nous permettent de simplifier nos équations qui peuvent alors s'écrire, quand le mouvement est devenu stationnaire, c'est-à-dire quand

$$\frac{\partial u}{\partial t}, \frac{\partial v}{\partial t}, \frac{\partial w}{\partial t},$$

peuvent être négligés :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dfrac{\partial V}{\partial x} + \dfrac{1}{\rho} \dfrac{\partial p}{\partial x} = 0, \\ \dfrac{\partial V}{\partial r} + \dfrac{1}{\rho} \dfrac{\partial p}{\partial r} = \dfrac{\Omega^2}{r^3}. \end{array} \right. \qquad (3)$$

Quant à la relation dite de continuité (2), elle est identiquement satisfaite.

4. — Nous pouvons encore transformer nos équations de façon à en éliminer une des inconnues p et ρ, en nous appuyant, ce que nous n'avons pas encore fait

[1] ρ est supposé fonction de R, bien entendu.

explicitement, sur les lois de l'équilibre adiabatique. Celles-ci nous apprennent, en appelant γ le rapport des deux chaleurs spécifiques, que l'on a constament pour une même portion du Soleil :

$$\frac{p}{\rho^\gamma} = \frac{p_0}{\rho_0^\gamma}, \qquad \frac{p}{\rho} = \mathrm{HT},$$

p_0 et ρ_0 étant deux valeurs particulières prise au cours du temps par la pression et la densité.

Il est commode d'introduire ici la notion de « température potentielle ». C'est celle qu'un gaz acquerrait si on l'amenait par compression adiabatique à une densité égale à l'unité. Nous appellerons cette température Θ et nous remarquerons qu'on peut la considérer comme mesurant en quelque sorte la quantité d'énergie calorifique interne contenue dans la portion de matière gazeuse envisagée. De même, nous définirons ce qu'Emden appelle la « pression potentielle » Π comme celle subie par le gaz quand on l'amène à la température potentielle par des transformations adiabatiques. Si le Soleil était *uniformément* en équilibre adiabatique, Π et Θ resteraient constants dans toute sa masse ; mais chez un élément qui rayonne de la chaleur au dehors, les valeurs correspondantes de Π et Θ s'abaissent aussitôt.

On a d'ailleurs :

$$\Pi = \mathrm{H}\Theta,$$

d'où :

$$p = \rho^\gamma \mathrm{H}\,\Theta.$$

On en déduit, s étant une direction quelconque :

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial s} = \frac{\gamma}{\gamma - 1}(\mathrm{H}\Theta)^{\frac{1}{\gamma}}\frac{\partial}{\partial s}\left(p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right),$$

et si l'on pose :

$$\theta = \frac{\gamma}{\gamma - 1}(H\Theta)^{\frac{1}{\gamma}}, \qquad \pi = p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}},$$

il vient :

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial s} = \theta \frac{\partial \pi}{\partial s}, \qquad \theta = \text{constante}.$$

Puisque γ est > 1, θ varie dans le même sens que Θ et peut servir à mesurer la chaleur interne d'une masse gazeuse donnée ; π varie de même avec p. Mais à la place des deux variables ρ et p de nos équations, nous pouvons n'en conserver qu'une seule p, puisque les transformations adiabatiques laissent θ constant. Nos équations (3) deviennent :

$$\begin{cases} \dfrac{\partial V}{\partial x} + \theta \dfrac{\partial \pi}{\partial x} = 0, \\ \dfrac{\partial V}{\partial r} + \theta \dfrac{\partial \pi}{\partial r} = \dfrac{\Omega^2}{r^3}, \end{cases} \qquad (4)$$

relations qui contiennent deux constantes θ et Ω. Toutefois θ *et* Ω *ne sont constants, comme nous l'avons dit, qu'à l'intérieur des couches fluides où se produisent des mouvements de convection,* et que nous appellerons « couches homogènes ». D'une couche à l'autre ces quantités peuvent varier brusquemeut.

5. — A l'intérieur d'une couche homogène on a, par intégration des équations (4) :

$$V + \theta\pi = -\frac{1}{2}\frac{\Omega^2}{r^2} + C, \quad (C = \text{constante}). \qquad (5)$$

Désignons par les indices 1 et 2 les valeurs des variables relatives à deux couches voisines : la surface

de séparation de celles-ci sera définie par $\pi_1 = \pi_2$, π_1 et π_2 variant ensemble le long de la surface.

L'équation des courbes méridiennes des surfaces de discontinuité cherchées sera donc en coordonnées semi-polaires R et r :

$$V\left(\frac{1}{\theta_2}-\frac{1}{\theta_1}\right)=\frac{1}{2r^2}\left(\frac{\Omega_1^2}{\theta_1}-\frac{\Omega_2^2}{\theta_2}\right)-\frac{C_1}{\theta_1}+\frac{C_2}{\theta_2}. \quad (6)$$

Par dérivation, nous aurons la direction de la tangente à ces courbes méridiennes, ce qui donnera :

$$\frac{dr}{dR}=r^3\frac{dV}{dR}\left(\frac{\theta_2-\theta_1}{\Omega_1^2\theta_2-\Omega_2^2\theta_1}\right).$$

Le coefficient différentiel a donc le même signe que $\frac{\theta_2-\theta_1}{\Omega_1^2\theta_2-\Omega_2^2\theta_1}$. Si cette expression s'annule, ce qui a lieu pour $\theta_1=\theta_2$, $\Omega_1=\Omega_2$, la courbe méridienne a sa tangente parallèle à l'axe solaire. On voit donc que les surfaces de discontinuité des couches qui, avec des réserves de chaleur égales, ont des moments de rotation différents, sont des cylindres de révolution concentriques, parallèles à l'axe solaire.

6. — Mais ce cas est loin d'être celui de la réalité ; les quantités d'énergie calorifique contenues dans deux couches voisines sont en général inégales. Pour se rendre compte alors de la disposition des différentes couches à l'intérieur du Soleil, Emden a recours à l'artifice suivant.

Les surfaces de discontinuité sont déterminées par la condition $\pi_1 - \pi_2 = 0$, qui représente l'égalité de pression des deux côtés. Si en un point donné, par une légère déformation de la surface, on s'éloigne sur la

normale primitive d'une petite quantité dn, $\pi_1 - \pi_2$ cessera d'être nul ; s'il est de même signe que dn (compté positivement pour fixer les idées dans le sens allant de la région 2 à la région 1), on aura :

$$\frac{\partial(\pi_1 - \pi_2)}{\partial n} > 0,$$

π_1 sera plus grand que π_2 ; la déformation tendra à disparaître et l'équilibre sera stable. Il serait instable dans le cas contraire si $\frac{\partial(\pi_1 - \pi_2)}{\partial n} < 0$. Le raisonnement précédent ne cesse pas d'être valable si l'on se déplace dans une direction arbitraire dh autre que la normale, et il suffit encore d'étudier le signe de la dérivée $\frac{\partial(\pi_1 - \pi_2)}{dh}$.

Pour montrer l'application de ce procédé, supposons (fig. 31) que nous nous déplacions parallèlement à l'axe solaire (r constant) vers l'extérieur. On aura alors[1], d'après l'équation (5) :

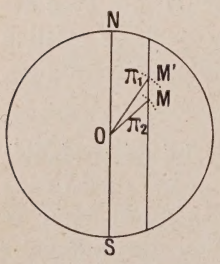


Fig. 31.

$$\frac{\partial(\pi_1 - \pi_2)}{\partial R} = \frac{\partial V}{\partial R}\left(\frac{1}{\theta_2} - \frac{1}{\theta_1}\right).$$

On en conclut que $\frac{\partial(\pi_1 - \pi_2)}{\partial R}$ est positif si $\theta_1 > \theta_2$. L'équilibre

[1] D'un côté de la surface on a :

$$V + \theta_1\pi_1 = -\frac{1}{2}\frac{\Omega_2}{r^2} + C_1,$$

et de l'autre : $$V + \theta_2\pi_2 = -\frac{1}{2}\frac{\Omega_2^2}{r^2} + C_2.$$

sera donc stable si la couche de plus forte chaleur interne est la plus voisine du pôle.

Un raisonnement tout à fait analogue montrerait que, plus on s'éloigne de l'axe solaire sur une sphère concentrique, plus le rapport $\frac{\Omega^2}{\theta}$ devient grand, — quand l'équilibre est stable. Cela revient à dire que si, sur une telle sphère, on s'éloigne de l'axe, les couches de plus grande chaleur et de plus petit moment de rotation seront les plus voisines de l'axe. Il est d'ailleurs à remarquer que, par le refroidissement, c'est-à-dire lorsque θ diminue, les couches de plus grand moment de rotation Ω s'enfoncent, tandis que d'autres où Ω est plus faible prennent leur place; on peut donc dire que, dans le Soleil, plus Ω est grand, plus la valeur correspondante de θ est faible.

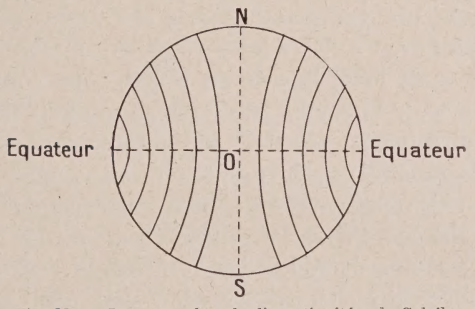


Fig. 32. — Les « couches de discontinuité » du Soleil, d'après la théorie d'Emden.

De ce qui précède on peut conclure que les surfaces de discontinuité sont telles, qu'en se déplaçant sur elles on va vers l'extérieur, en même temps qu'on s'éloigne

de l'axe. Ceci nous permet de nous faire une idée de la forme de ces surfaces, lesquelles ne sont pas fermées, mais coupent au contraire la photosphère suivant des parallèles solaires. Ce sont des surfaces de révolution, et leurs sections méridiennes sont représentées sur la figure 32.

7. **Conséquences de la théorie.** — Si nous connaissions avec certitude le rapport γ des chaleurs spécifiques dans le Soleil, ainsi que la loi de la distribution intérieure des quantités Ω, θ et C, nous pourrions construire avec rigueur les surfaces en question ; notre ignorance de l'état interne du Soleil nous contraint à nous en tenir là sur ce point. Il ne faudrait d'ailleurs pas croire que le Soleil se décompose tout entier en couches homogènes de l'espèce décrite ; nous devons plutôt nous représenter les choses d'une manière un peu moins absolue. Ce ne sont, sans doute, que des portions plus ou moins étendues des surfaces de discontinuité qui se forment réellement dans le Soleil sous l'influence du refroidissement ; il doit, selon toute probabilité, y avoir dans la distribution stratiforme décrite plus haut de nombreuses irrégularités, qui toutefois n'en détruisent pas le caractère.

A l'intérieur de chaque couche homogène, θ et Ω sont constants ; mais les diverses couches glissent les unes sur les autres avec des vitesses angulaires différentes, car les deux constantes θ et Ω, et en particulier la dernière, varient brusquement d'une couche à l'autre. Comme la vitesse linéaire à l'intérieur d'une couche est $\frac{\Omega}{r}$, les vitesses de la masse fluide de part et d'autre

d'une surface de discontinuité sont d'autant plus différentes que le point considéré et plus près de l'axe. Le frottement des couches contiguës donne donc naissance à des tourbillons de plus en plus violents au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'axe. Ces sortes de vagues se brisent les unes sur les autres et finissent par mélanger ensemble les matières en présence. De nouvelles couches homogènes se forment alors avec de nouvelles surfaces de discontinuité et les mêmes phénomènes peuvent ainsi se reproduire indéfiniment.

8. — D'une façon générale Emden considère le mécanisme que nous avons décrit dans ces quelques pages comme nécessairement réalisé par la nature, par ce seul fait que le Soleil a un mouvement de rotation. Il est certain qu'en principe la théorie proposée ici est indiscutable : toute la question est de savoir *dans quelle mesure* la faible rotation solaire arrive à produire les phénomènes exposés par Emden. Celui-ci va même plus loin : d'après lui, la conductibilité et le frottement intérieur sont trop faibles dans les gaz pour expliquer comment le rayonnement du Soleil est sans cesse entretenu ; la formation des couches discontinues et leurs glissements étant certains, ce ne peut être que par leur mélange que les moments de rotation et les températures potentielles parviennent à s'égaliser.

Examinons de plus près la question du refroidissement. Si le Soleil ne tournait pas, les courants de convection pourraient se former librement et brasseraient la masse à toutes les profondeurs : l'astre se refroidirait, comme le voulaient *Homer Lane*, *Helmholtz* et *Sir W. Thomson*. La rotation n'altère pas ceux des cou-

rants qui cheminent le long de l'axe vers les pôles (ou qui en viennent). Mais plus on se rapproche de l'équateur, plus la formation des courants de convection est contrariée par les surfaces d'Emden, et moins ceux-ci pénètrent profondément dans le Soleil : ils ne peuvent s'effectuer qu'à l'intérieur de chaque couche individuelle entre deux surfaces de discontinuité consécutives. Les pertes de chaleur doivent donc être plus difficilement récupérées à l'équateur qu'aux pôles, et dans ce cas la surface solaire doit être plus chaude près des pôles que près de l'équateur.

On peut raisonner de même en ce qui concerne les vitesses angulaires; nous avons d'ailleurs vu qu'il est impossible de parler d'une vitesse de rotation unique du Soleil. Or le refroidissement de la surface amène une contraction correspondante, et la vitesse angulaire des parties superficielles s'accroît; mais alors qu'aux pôles les courants convectifs égalisent les vitesses angulaires, à l'équateur ces courants sont arrêtés et les régions extérieures ne peuvent plus communiquer aux parties profondes leur surcroît de vitesse. Il y a donc accélération apparente des faibles latitudes, ainsi que l'observation le constate (loi de *Carrington* sur la rotation du Soleil).

9. **Les taches.** — Les couches solaires, par leurs frottements mutuels, jouent encore, d'après Emden, un autre rôle : ce sont elles qui produisent les taches, et cela de la façon suivante. Entre deux couches contiguës, des vagues tourbillonnaires prennent naissance, comme nous l'avons vu; leur sens de rotation est, on le voit sans peine, le même que celui du Soleil Or ces

mouvements giratoires engendrent, comme dans les tourbillons de nos rivières ou les cyclones de notre atmosphère, une diminution de pression, une succion dans le sens de l'axe. Les causes initiales des taches ne seraient autres que ces petits tourbillons locaux, et il y aurait bien ainsi, comme le pensent la plupart des observateurs, dépression de la photosphère dans le cas où le remous se formerait à peu de distance de la surface. Les matières photosphériques attirées vers le bas par la rotation tendent à s'engouffrer dans la dépression formée et donnent naissance à un cratère irrégulier. Les masses gazeuses plus centrales, venant remplacer celles-là, engendrent les protubérances et aussi les facules qui presque toujours entourent les taches. Peu à peu le frottement intérieur fait disparaître le tourbillon, cause primitive du phénomène. Si les tourbillons ont leur siège tout près de la surface, des mouvements giratoires de sens opposé pour les deux hémisphères pourront se manifester dans la tache ; mais pour peu que les troubles sous-jacents soient à quelque profondeur, il n'en sera pas ainsi. Une grosse objection que l'on faisait, non sans raison, à la théorie cyclonique de *Faye*, disparaît par là dans celle d'Emden. D'ailleurs les tourbillons les plus profonds ne se manifestent guère à la surface, excepté par des facules ou des protubérances.

10. — Emden explique aussi la répartition des taches solaires sur la surface. La forme même des couches montre (figure 32) qu'autour de l'équateur doit exister une zone où les taches ne sauraient guère se former : ce n'est qu'exceptionnellement qu'une surface de discontinuité peut être dissymétrique et occasionner ainsi

des taches dans ces régions. De même, au voisinage des pôles, les surfaces d'Emden prennent difficilement naissance, et s'il a pu s'en former, c'est seulement aux grandes profondeurs que les différences de vitesse linéaire deviennent suffisantes pour produire des tourbillons : ceux-ci ne se révèlent alors pas par des taches. Les taches doivent, par conséquent, nous apparaître en plus grand nombre dans les latitudes moyennes. Si nous connaissions la loi de variation de Ω et θ dans le Soleil, nous pourrions même calculer les latitudes de plus grande fréquence ; malheureusement nous devons, pour le présent, nous contenter de ce raisonnement qualitatif.

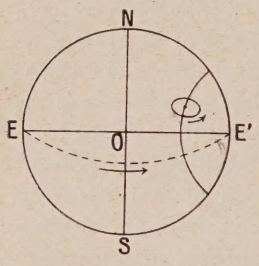


Fig. 23.

11. — On sait qu'après une période de rareté, les taches commencent à se montrer dans les hautes latitudes pour descendre ensuite dans les régions tropicales à mesure que leur fréquence augmente : c'est la loi découverte par *Spörer*. Emden l'interprète comme suit : Après une période d'inactivité, les couches superficielles, toutes proportions gardées, se refroidissent plus fortement avant de se rapprocher du centre ; les courants internes ne viennent plus contribuer dans la même mesure à rétablir l'équilibre thermique. Les surfaces de discontinuité, en raison même du repos relatif de la masse, peuvent plus aisément se former aux grandes profondeurs et dans les hautes latitudes. Les

taches ont alors plus de tendance à envahir ces régions et, tandis que l'activité de l'astre va croissant, les troubles intérieurs dont les taches sont les signes ne peuvent plus guère apparaître que dans le voisinage du plan équatorial.

12. — Remarquons d'ailleurs, d'une façon générale, qu'Emden explique au fond les taches par une diminution interne de la pression, ou, si l'on préfère, par une aspiration vers le bas; toutes les conclusions que l'on peut tirer de données analogues sont donc encore valables ici. Ainsi, par exemple, les courants descendants de gaz extérieurs à la photosphère, imaginés par d'*Oppolzer*, et les affaissements locaux de *Young*[1] produiraient des effets identiques à ceux décrits plus haut.

Malheureusement, la période de onze ans de l'activité solaire reste inexpliquée : il faut avouer d'ailleurs que, les influences planétaires exceptées[2], bien peu de théories expliquent sérieusement le chiffre de onze ans lui-même ; on se borne, en général, à une allusion vague aux phénomènes intra-solaires. Comme Emden ne repousse nullement l'idée d'un noyau central solide. — idée qui, dans son Mémoire, ne joue aucun rôle et est par là même indifférente, — il se ménage sans doute de ce côté une porte de sortie, et l'on ne saurait lui reprocher de s'en tenir, sur ce point, aux opinions de ses devanciers.

Quoi qu'il en soit, la conclusion qu'Emden tire de

[1] *Le Soleil*, trad. française, p. 140.

[2] Et on ne peut guère, nous le verrons, accepter leur réalité (p. 235).

ses recherches nous paraît justifiée ; aussi la citerons-nous textuellement : « Le refroidissement par rayonnement d'un corps céleste fluide, au moins dans ses parties extérieures, doit *nécessairement* avoir les conséquences suivantes : répartition de la masse entière en couches, vitesses de rotation variables dans le temps et dans l'espace, enfin apparition de phénomènes analogues aux taches. »

THÉORIE D'EKHOLM

1. **Interprétation des taches.** — La théorie d'*Ekholm*[1] peut être considérée comme ayant ouvert la voie à celle d'*Emden*, qui lui a emprunté la plupart de ses prémisses. Ekholm admet aussi l'existence de courants descendants nés du refroidissement, qui, aux pôles, pénètrent plus avant dans l'intérieur de l'astre qu'à l'équateur. Pour lui également, les causes naturelles des taches sont des tourbillons internes qui doivent surtout apparaître dans les moyennes latitudes ; mais il ne conçoit pas de la même façon le mécanisme de ces tourbillons ; ceux-ci se formeraient, d'après lui, par la seule rencontre des courants de convection opposés, *intérieurs à chaque couche*, sans que le frottement des surfaces de discontinuité joue là aucun rôle. Bien entendu, les différents tourbillons doivent se contrarier naturellement, et c'est précisément ce qui donne à la

[1] Bihang till Kongl. Svenska Vetenskaps-Akademiens Handlingar. Stockholm (Norstedt et fils) (1901), mémoire intitulé *Periodicität der Sonnentätigkeit*. — Voir aussi *Meteorologische Zeitschrift*, t. XVIII (1901), p. 330.

photosphère son apparence granulaire. Les extrémités supérieures des courants ascendants non encore refroidies par le rayonnement constituent les grains brillants, tandis que le milieu sombre intersticiel correspond aux masses déjà refroidies emportées par les courants descendants. C'est d'ailleurs ainsi que *Faye* expliquait les « grains de riz », et Ekholm n'a là-dessus, il en convient, rien imaginé de bien nouveau.

2. **Causes de la périodicité.** — Si les diverses couches du Soleil étaient entièrement fluides, il serait, d'après Ekholm, impossible d'expliquer la périodicité des phénomènes solaires. La température des espaces célestes se maintient en effet, selon toute vraisemblance, à peu près constante pendant des millions d'années; si le rayonnement calorifique du Soleil l'était aussi, comme cela serait le cas pour un astre entièrement fluide, les variations périodiques n'auraient pas de cause admissible.

Or, en vertu de la théorie de *Helmholtz*, le volume du Soleil était autrefois beaucoup plus grand qu'il n'est à présent et ses constituants gazeux plus raréfiés, tandis que la température était bien plus basse qu'actuellement. Mais, dans un gaz, le frottement intérieur et la viscosité croissent aussi bien avec la densité qu'avec la température. Ceci nous autorise à penser que l'activité solaire devient d'autant plus sujette à des fluctuations que le Soleil en arrive à des stades plus avancés de son développement.

Dans les temps les plus reculés contemporains à la nébuleuse primitive, les gaz solaires étaient d'une extrême mobilité : les modifications apportées par le

rayonnement à l'équilibre adiabatique se trouvaient presque immédiatement compensées par des courants convectifs verticaux réguliers; ces phénomènes ont dû se poursuivre avec une uniformité presque parfaite, et les taches n'existaient sans doute pas encore. Mais, plus le Soleil se contractait, plus la résistance opposée par le frottement intérieur aux courants devenait considérable. Des différences locales de température et de pression ont pu alors prendre naissance et subsister un certain temps sans que les courants vinssent rétablir l'équilibre. Cet état d'équilibre instable en quelque sorte n'a pu durer indéfiniment; aussitôt que les forces élastiques qui le maintenaient eurent dépassé une certaine limite, il s'est trouvé brusquement détruit dans une nouvelle répartition tumultueuse des couches superficielles. A ce cataclysme a dû succéder une époque de calme, suivie elle-même d'une nouvelle période troublée, et ainsi de suite, les oscillations de l'activité solaire devenant peu à peu, quoique très lentement, de plus en plus fréquentes au cours des siècles.

3. **Hypothèse accessoire.** — Dans l'idée d'Ekholm, ce mécanisme n'expliquerait que la raison intime de la périodicité solaire : les causes qui jouent en quelque sorte le rôle de régulateur et excitent à intervalles à peu près égaux l'activité de l'astre, il les cherche dans l'influence des planètes.

Le Soleil est, en effet, entouré d'une atmosphère énorme, extrêmement raréfiée, qui possède le pouvoir de diffuser sa lumière : c'est la couronne. Comme les planètes, la couronne est sans doute fortement chargée d'électricité; les actions électriques exercées par les pla-

nètes peuvent alors déformer notablement l'atmosphère du Soleil, partant faire varier d'une manière sensible le rayonnement et le refroidissement consécutif de la photosphère. Les couches superficielles de la photosphère seront alors plus ou moins denses selon les endroits, ce qui favorisera les perturbations de l'équilibre; les parties les plus denses de la surface solaire coïncideront alors vraisemblablement avec des régions d'activité où les taches et les facules auront tendance à se montrer.

4. — Ce raisonnement expliquerait sans doute l'influence, d'ailleurs mal établie, que les configurations planétaires paraissent avoir sur l'activité solaire. Il existe ainsi une certaine disposition de Vénus, de la Terre et de Jupiter[1], étudiée par *Sellmaier* et qui a l'air de correspondre aux maxima des taches avec une période précisément égale à onze ans. Ekholm a repris la question, et en compilant de très anciennes observations chinoises ou autres, il a, assure-t-il, trouvé un accord remarquable, surtout si l'on se borne aux moyennes.

Wolf avait également trouvé une autre configuration de Vénus et de Jupiter avec le Soleil qui semble assez satisfaisante. Il faut bien avouer qu'il y a dans tout cela une forte part d'arbitraire : étant donné un phénomène quelconque, à peu près périodique, il serait facile de trouver des configurations de planètes qui coïncident avec lui. C'est ainsi que *Langley* propose

[1] Dans cette configuration, les trois planètes citées sont en ligne droite avec le Soleil.

quelque part « d'expliquer » de cette façon astronomique, par un choix judicieux de planètes, les hauts et les bas des actions de chemins de fer américains à la Bourse de New-York. Nous devons dire qu'on est assez d'accord à présent pour renoncer absolument à toute explication de cette nature fondée sur les forces de gravitation[1]. Ce qui n'exclut nullement les autres phénomènes et en particulier les actions électriques. De sorte que la possibilité d'influences planétaires, quoique peu vraisemblable par ailleurs, est loin d'être écartée : la question n'est pas tranchée.

5. — On ne saisit cependant pas très bien pourquoi Ekholm a besoin d'introduire dans sa théorie une nouvelle hypothèse, somme toute fort hasardeuse, et cela après avoir déjà trouvé à l'intérieur du Soleil une autre raison de la périodicité. Si l'on admet les effets décrits plus haut du conflit entre le refroidissement et la viscosité solaire, il devient inutile de parler de l'influence des planètes.

Ekholm considère du reste la photosphère comme formée de gaz si denses, que l'on peut lui attribuer, à quelques milliers de kilomètres de profondeur, la viscosité du fer rouge-blanc. *Scheiner* lui reproche[2] ici de ne pas tenir compte du faible poids spécifique du Soleil. Il n'est cependant pas indispensable de supposer à l'astre une forte densité pour que les idées d'Ekholm sur la cause purement solaire de la périodicité soient valables. La viscosité seule entre ici en jeu et, comme

[1] A la distance des planètes, ces forces seraient insignifiantes.

[2] Scheiner, *Populäre Astrophysik*, 1908, Berlin et Leipzig, p. 437.

nous l'avons vu, il paraît certain que le Soleil, indépendamment de sa viscosité véritable, possède, rien que par l'effet des pressions intérieures qui y règnent[1], une rigidité énorme.

AUTRES THÉORIES SUR LA ROTATION DU SOLEIL ET LA PÉRIODICITÉ DE SON ACTIVITÉ TRAVAUX DE WILSING ET DE WILCZYNSKI

1. — La périodicité de l'activité solaire constitue, il faut bien le dire, un phénomène des plus complexes et un des plus diffficiles problèmes de la nature; quelques essais, en dehors de celui d'Ekholm, ont pourtant été tentés dernièrement.

Faisons remarquer que les fluctuations des taches[2] sont loin d'être régulières, les maxima et les minima sont plus ou moins accentués selon les époques; et il est même possible que la période undécennale soit englobée dans une autre plus vaste[3], tandis qu'il peut y avoir des périodes plus petites. En même temps que la latitude moyenne des taches se déplace, conformément à la loi de *Spörer,* leurs spectres varient aussi périodiquement : alors que vers le minimum on y trouve de nombreuses raies du fer élargies, dans le voisinage du maximum ce sont surtout les raies du vanadium et du scandium qui prédominent. Pendant

[1] Rigidité et viscosité sont ici synonymes, le premier terme s'appliquant plutôt aux solides. Voir plus haut, recherches de T. J. J. See, page 202.

[2] Nous nous occupons surtout des taches plus aisées à étudier directement.

[3] On a parlé d'une période de 65 ans; voir, par exemple, Halm, *Annals Edinburgh observatory,* vol. I, p. 99, 1902.

ce temps les raies ordinaires de Fraunhofer ne semblent pas éprouver de changements dans les régions ordinaires du Soleil, et cette singulière fixité n'est pas un des côtés les moins curieux de la question.

Nous avons dit quelques mots[1] des tentatives d'explications par les influences planétaires ; nous nous bornerons toutefois à remarquer que le peu de régularité de la période s'accorde mal avec cette idée ; il semble que c'est plutôt dans l'intérieur même de l'astre que doit se trouver la clef de l'énigme.

2. **Idées de Wilsing.** — M. *Wilsing*[2] admet que le Soleil renferme un noyau dont l'état moléculaire, dans le sens que nous donnons ordinairement à ce mot, importe peu ; mais qui, en raison des fortes pressions qu'il subit, se comporte à peu près comme un corps solide[3] et tourne par suite tout d'une pièce avec une vitesse angulaire définie. Ce noyau, dont la surface doit être bien au-dessous du niveau des taches solaires, est entouré d'une enveloppe gazeuse de température et de pression décroissant de l'intérieur à l'extérieur. L'enveloppe et le noyau tournent autour du même centre ; mais la première ne se meut plus à la manière d'un corps solide : elle possède des vitesses angulaires variables avec la latitude, vitesses que les mouvements des taches nous révèlent. Au sein de cette atmosphère, des courants prennent naissance, et le frottement intérieur des gaz tend à les arrêter ; les différences pos-

[1] Voir plus haut, à propos de la théorie d'Ekholm, p. 234.
[2] *Astr. Nach.*, n° 3039, 1891 ; *Astroph. Journ.*, vol. III, 1896, p. 247.
[3] Cf. les travaux de T. J. J. See, p. 202 de ce volume.

sibles entre la vitesse de rotation de l'enveloppe et celle du noyau ont donc une tendance à s'égaliser.

En partant de ces données, Wilsing traite alors mathématiquement le problème à l'aide des équations de l'hydrodynamique. Ces recherches étant fort compliquées, nous n'entrerons pas dans les détails. L'auteur arrive finalement à cette conclusion que les intervalles de temps au cours desquels les vitesses pourraient varier d'une façon appréciable sont énormes par rapport à la durée totale des observations humaines : on est donc en droit de considérer la rotation solaire comme constante dans l'état actuel de l'évolution solaire.

3. — Ce point préliminaire une fois établi, Wilsing rappelle un travail du professeur *G. H. Darwin* sur la physique du globe [1], d'où il tire, à proprement parler, sa théorie. Le savant anglais part de ce fait que, dans un sphéroïde fluide (liquide ou gazeux), l'axe instantané de rotation peut, par suite de mouvements des masses intérieures, cesser de coïncider exactement avec l'axe de symétrie. La masse totale du globe doit alors tendre, dans son déplacement, à éliminer la perturbation et à rétablir un équilibre où les deux axes coïncideront de nouveau, équilibre correspondant au minimum du potentiel. Mais le frottement intérieur oppose au mouvement une résistance qui, retardant le retour à l'état primitif, permet à une perturbation, infiniment petite au début, de grandir et d'atteindre une valeur finie. L'axe de rotation s'écarte alors de plus en plus de l'axe de symétrie, jusqu'au moment où la viscosité ne suffit

[1] Voir là-dessus : Newcomb, *Monthly Notices*, vol. LII, p. 336.

plus à s'opposer au rétablissement de l'état initial. Les choses rentrent alors brusquement dans l'ordre, en attendant qu'une nouvelle perturbation ramène le même cycle de phénomènes. Wilsing admet donc que cette théorie mécanique peut s'appliquer au Soleil, chez lequel notamment un déplacement des masses, quoique très lent, a fort probablement lieu, rien que par suite de sa condensation progressive. Dans ces conditions, les taches et les protubérances ne seraient que les effets extérieurs de ces phénomènes internes : la loi de Spörer, par son allure même, est d'ailleurs, ne l'oublions pas, plutôt favorable à une brusque discontinuité des causes de la périodicité.

4. — Il est évident que la suite des événements peut être considérablement modifiée par bien des circonstances, de sorte que c'est seulement dans les moyennes d'un grand nombre de périodes que l'on doit s'attendre à trouver une certaine régularité. Si, d'autre part, les réactions mécaniques atteignent leurs maxima aux endroits où les forces en jeu sont elles-mêmes les plus sensibles, on doit alors observer les effets les plus considérables dans le voisinage de l'équateur solaire. Une autre remarque à faire est que, si l'explication de Wilsing contient une part importante d'hypothèse en ce qui touche le Soleil actuel, il arrivera presque certainement une époque plus ou moins éloignée où la constitution attribuée à l'astre se réalisera.

D'ailleurs, quoique la théorie de Wilsing n'explique pas la formation d'une tache ni d'une protubérance isolée, elle montre comment, à certaines époques et à certains endroits, il peut y avoir tendance plus ou moins

forte à la formation des taches. Comme les phénomènes invoqués sont, en définitive, des courants, il devient naturel d'attribuer les taches à des mouvements atmosphériques particuliers, ainsi que le font la plupart des théories solaires.

5. — Un autre savant, M. *Sampson*[1], est arrivé, dans un mémoire mathématique très étendu, à des conclusions pratiquement fort analogues à celles de Wilsing. Comme lui, il trouve que la rotation solaire telle que nous l'observons ne saurait se modifier sensiblement avant des millions d'années : d'immenses suites de siècles s'écouleront donc sans doute avant que l'astre en arrive à tourner tout d'une pièce. Les deux auteurs pensent, — idée reprise par M. *See*, — que la rigidité interne doit s'opposer fortement aux courants convectifs dans le noyau ; ces derniers se trouvent donc confinés à l'intérieur d'une couche relativement mince et le rayonnement solaire ne peut guère s'alimenter ainsi d'une manière suffisante. C'est là une objection sérieuse ; on pourrait peut-être y répondre en faisant intervenir un rayonnement direct[2], tel que celui qui traverse le vide interplanétaire. Wilsing croit d'ailleurs que, dans le stade avancé de leur évolution où sont les étoiles fixes, les courants radiaux commencent à disparaître : l'assertion est des plus contestables ; on pourrait presque aussi facilement soutenir le contraire.

6. — Notons en passant qu'avec les théories de Wilsing et de Sampson, la loi de rotation découverte

[1] *Memoirs Royal Astr. Soc.*, vol. LI, p. 123, 1874.
[2] Voir plus haut, p. 215.

par Carrington cesse d'être une énigme physique aussi impérieuse : elle n'est plus alors qu'un vestige obscur des conditions initiales de la formation du Soleil. Toute explication se trouve ainsi rejetée indéfiniment dans le passé et perd par là même une grande partie de son intérêt.

7. **Travaux de Wilczynski.** — Dans une thèse présentée en 1896[1] à l'université de Berlin, M. Wilczynski s'est également occupé de ces questions. Beaucoup des résultats auxquels il est arrivé ayant été retrouvés plus tard plus élégamment par Emden et déjà décrits par nous, nous n'entrerons pas dans de grands détails. Disons seulement que Wilczynski, dans son travail primitif, tout comme Wilsing et Sampson, ne considère pas le régime permanent comme atteint : Emden au contraire, en ne faisant pas varier la vitesse angulaire au cours du temps, apportait au problème une simplification que les recherches de ses prédécesseurs avaient montrée être sans inconvénient.

L'influence du frottement, traitée à part par Wilczynski, le conduit aux mêmes conclusions que Wilsing et Sampson, bien que par des voies différentes, à vrai dire moins rigoureuses : les modifications que la viscosité doit apporter à l'équilibre de l'astre ne peuvent être que très lentes[2].

[1] *Astronomical Journal*, n° 416, et *Astroph. Journal*, vol. IV, 1896, p. 101.

[2] L'arc décrit en un jour par un point de la surface solaire ne saurait varier, d'après notre auteur, par suite de la viscosité, de plus de 2′ en 27 millions d'années.

8. — Dans une publication postérieure M. Wilczynski tient compte, dès le début, du frottement ; il suppose seulement, pour simplifier, qu'il s'agit non plus de la rotation d'une masse gazeuse, mais d'un fluide incompressible ; il trouve dans cette hypothèse que la vitesse angulaire peut encore dépendre du temps d'une manière périodique et aussi que, sous certaines conditions, il peut en être de même pour la température.

On voit donc que le problème de l'équilibre solaire, sans avoir jamais été traité dans toute son intégralité, a été abordé par différents côtés, et, en ce qui concerne la rotation et la périodicité, les mémoires de *Wilsing*, de *Sampson* et de *Wilczynski*, joints à celui d'*Emden*, permettent de lui donner au moins une solution vraisemblable. Il n'est guère permis d'espérer plus, vu l'ignorance profonde où nous sommes encore d'un grand nombre des données fondamentales de la question.

CHAPITRE V

LE CHAMP ÉLECTROMAGNÉTIQUE DU SOLEIL ET LES THÉORIES DE LA COURONNE.

HISTORIQUE ET GÉNÉRALITÉS

1. — Jusqu'à ces trente dernières années, les diverses théories proposées du rayonnement solaire n'avaient pas d'autre but que d'expliquer la constitution du Soleil et son émission calorifique ou lumineuse. En effet, exception faite de la gravitation, dont l'origine était et est d'ailleurs restée un mystère impénétrable, on ne connaissait alors aucune autre action solaire que ces deux-là. La pensée que l'astre central de notre système pût réagir sur notre planète d'une manière différente ne venait guère à l'esprit, et ce n'est que dans la seconde moitié du XIX^e^ siècle[1] que

[1] Au XVIII^e^ siècle cependant, *De Mairan*, dans son livre sur les aurores boréales, avait cherché à rattacher certains phénomènes à l'atmosphère solaire : il admettait dans sa théorie que celle-ci se prolongeait jusqu'à la terre. Ce fait montre bien à quel point on était loin alors d'admettre que le Soleil pût influencer *à distance* les aurores polaires. Comme beaucoup de conquêtes importantes de la philosophie naturelle, celle-ci fut presque, on peut le dire, due au hasard, au hasard secondé par la ténacité humaine.

les progrès de la physique ont suggéré l'idée d'une influence solaire de nature électro-magnétique.

2. **Périodicité de l'activité solaire.** — Historiquement, ce furent les relations longtemps discutées, puis constatées entre les taches solaires et le magnétisme terrestre dans ses diverses manifestations, qui dirigèrent définitivement la science vers cette nouvelle voie pleine de promesses.

Un amateur allemand, *Schwabe*, avait eu pendant quarante-trois ans, de 1826 jusqu'à 1869, l'inlassable patience de relever jour par jour, avec une petite lunette, le nombre des taches solaires dans l'espérance bien incertaine d'y découvrir quelques lois; il comptait les taches, les inscrivait chaque soir, et reçommençait le lendemain. Son mérite fut cependant couronné de succès : il reconnut le premier la périodicité du phénomène, et annonça en 1843[1] l'existence d'une période de 10 ans. Un peu plus tard, l'astronome anglais *Carrington* confirmait sa découverte.

3. **Périodicité des variations magnétiques.** — Jusque-là il n'était question que du Soleil; mais, presque à la même époque (septembre 1851), John *Lamont*, un Ecossais devenu directeur de l'Observatoire de Munich, en examinant les observations magnétiques faites à Göttingen et à Munich, de 1835 à 1850, constata avec étonnement une périodicité de 10 ans 1/3 environ[2]. Les observations en question se rapportaient à la déclinaison magnétique de ces deux

[1] *Astr. Nach.*, nº 495.
[2] *Annalen der Physik*, Bd LXXXIV, 1851, p. 580.

villes d'Allemagne. Comme on le sait, la valeur de la déclinaison varie quotidiennement : elle est minima vers l'est aux environs de 8 heures du matin, et maxima vers l'ouest un peu avant 2 heures du soir. En d'autres termes, l'aiguille aimantée se rapproche de plus en plus du nord géographique jusque vers 8 heures du matin, pour s'en écarter bientôt peu à peu, jusqu'à 2 heures de l'après-midi, et s'en rapprocher de nouveau le lendemain.

C'est l'amplitude de cette variation diurne qui fut d'abord trouvée sujette à des augmentations et à des diminutions périodiques tous les 10 ou 11 ans.

4. **Influence des taches sur le magnétisme terrestre.** — L'hiver suivant, *Sir Edward Sabine*, qui n'avait pas eu connaissance des travaux de Lamont, entreprit l'étude d'une série d'observations fort différentes faites à Toronto (Canada) et à Hobarton (Tasmanie). Celles-là, au lieu de se rapporter à la variation diurne régulière, concernaient les brusques perturbations de l'aiguille aimantée que l'on appelle « orages magnétiques ». Sabine trouva[1] que ces orages se faisaient périodiquement plus violents et plus fréquents, et il eut l'idée de comparer la marche du phénomène avec la courbe tracée par Schwabe relative aux taches solaires. La concordance se révéla presque absolue : les deux courbes se suivent l'une l'autre dans presque toutes leurs sinuosités; leurs phases sont en outre les mêmes, ainsi qu'on peut le constater sur la figure 34. Peu de temps après *Wolf*[2] à Berne, et *Gau-*

[1] *Phil. Trans.*, vol. CXLII, 1852, p. 103.
[2] *Mittheilungen der Naturforschenden Gesellchaft*, 1852, p. 183.

tier[1] à Sion, arrivaient d'une manière indépendante aux mêmes conclusions que Sabine. L'étroite relation qui unit les taches du Soleil aux perturbations du magnétisme terrestre était établie.

5. — D'où peut provenir la concordance ainsi décelée? Comment le Soleil peut-il ainsi agir sur nos boussoles à la distance énorme qui le sépare de nous? C'est là une question qui est loin d'être élucidée actuellement, et l'était encore bien moins lors des découvertes que nous venons de rappeler. Mais le fait lui-même est indéniable, et quelles qu'aient été les discussions dont sa découverte fut l'objet[2], il ne laisse pas place au moindre doute.

6. — La loi empirique une fois reconnue, de vastes recherches ne tardèrent pas à être entreprises dans le but d'en vérifier les détails. On reprit la détermination de la période des taches solaires : elle fut trouvée égale à 11,11 ans, en remontant jusqu'au temps de Galilée et en utilisant tous les documents isolés; cette durée s'accorda encore mieux que celle obtenue par les premiers chercheurs (10 ans 1/3) avec les observations magnétiques.

7. — On ne tarda pas à remarquer la frappante analogie qui existe entre la courbe de fréquence des taches solaires et les courbes de lumière des étoiles variables. Dans un cas comme dans l'autre, la variation est plus rapide d'un minimum au maximum

[1] *Archives des sciences*, t. XXI, p. 194.

[2] C'est ainsi que *Faye* refusa longtemps d'y ajouter foi (Young, *le Soleil*, p. 121).

d'éclat que de ce dernier point au minimum suivant; on sait, en effet, que la plupart des étoiles variables augmentent plus vite d'éclat qu'elles ne diminuent ensuite. De plus, les divers maxima ne sont pas toujours de la même hauteur. Le Soleil se classerait donc dans la catégorie des étoiles variables; il est juste d'ajouter que son éclat photométrique ne doit cependant guère varier, et que nous ignorons si les étoiles qui nous paraissent d'éclat constant ne varient pas en réalité dans les mêmes limites que le Soleil, chose plus que probable.

8. **Taches solaires et météorologie**. — On a recherché s'il y avait aussi une relation entre les taches solaires et les conditions météorologiques. Le premier des *Herschel*[1] (*William*), puis *Arago*[2], *Wolf*[3], *Köppen*[4] et bien d'autres[5], entreprirent d'étudier ce point d'un intérêt pratique évident, à l'aide de statistiques parallèles. Mais les résultats qu'ils obtinrent furent loin d'être concordants, et la question n'est pas élucidée, malgré la masse énorme de travaux auxquels elle a donné lieu jusque dans ces derniers temps. Tout ce qu'on peut dire, c'est que si les taches du Soleil influent sur la température ou sur l'état atmosphérique, leur action n'est pas considérable et laisse place

[1] *Phil. Trans.*, vol. XCI, 1801, p. 316.

[2] Avec les registres de l'Observatoire de Paris, de 1822 à 1830.

[3] *Mittheilungen Naturf. Ges.*, 1852, p. 269.

[4] *Zeitschrift fur Meteorologie*, Vienne, t. VIII, 1873. — Ce mémoire est un des plus estimés : les températures terrestres moyennes seraient un peu moins élevées lors des maxima des taches solaires.

[5] Tout dernièrement encore M. *Nordmann*, dans sa thèse de doctorat (1905).

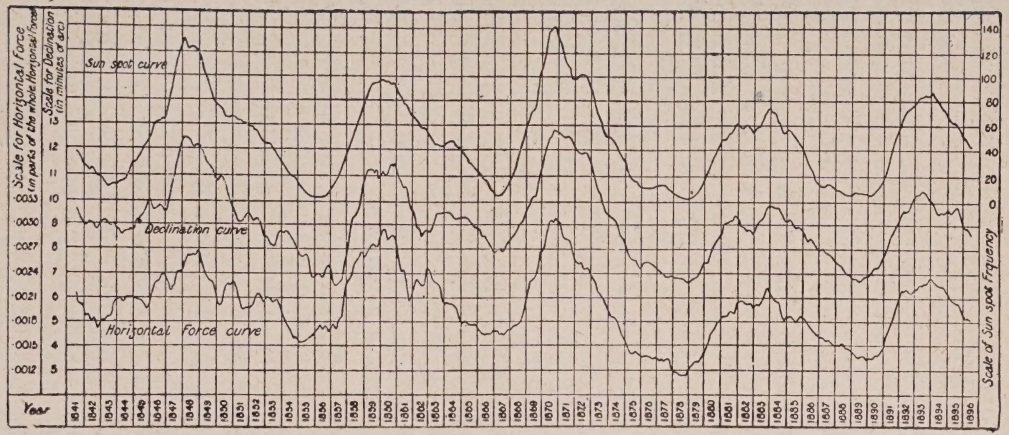


Fig. 34. — Périodicité des taches solaires et des variations magnétiques, d'après W. Ellis.

La courbe supérieure représente la fréquence des taches solaires avec les années, les deux autres donnent l'amplitude moyenne de la variation diurne et de la force horizontale.

à bien d'autres facteurs locaux infiniment plus importants.

9. **Aurores boréales.** — Par contre, en ce qui touche la fréquence des aurores boréales, les phénomènes sont plus nets. *Wolf*, à l'aide des *Chroniques* de Zürich (de l'an 1000 à 1800), a fait voir que les aurores boréales, tout comme les perturbations magnétiques, auxquelles elles se rattachent d'ailleurs intimement, suivent avec régularité le cycle des taches solaires. La relation des aurores polaires et des orages magnétiques était beaucoup plus anciennement connue, et avait été mise en évidence dès le milieu du XVIII^e^ siècle; les recherches d'*Arago*, vers 1819 et dans les années qui suivirent, rendirent indiscutable la parenté des deux ordres de faits. Il est à noter de plus que, dans les années de maximum des taches, les aurores boréales descendent en plus grand nombre dans les latitudes modérées, bien que la période de 11 ans ne se manifeste pas avec la même netteté dans les régions polaires.

10. **Autres influences sur le magnétisme terrestre.** — Tandis que l'influence du Soleil sur le magnétisme terrestre devenait de mieux en mieux établie, on s'apercevait que d'autres corps célestes pouvaient agir aussi. Les observations révélèrent une variation lunaire de période égale à celle du jour lunaire (c'est-à-dire $24^h,54^m$), et du même genre que la variation diurne due au Soleil. Cette sorte de perturbation est très faible, quoique hors de doute[1]; elle

[1] Elle a été signalée pour la première fois par *Kreil*, en 1841,

est surtout importante en ce qu'elle fournit, sur le phénomène cosmique mystérieux qui nous occupe, une donnée intéressante.

Les travaux de *Sabine*, d'après les observations d'Hobarton et de Toronto, montrèrent en outre que l'influence solaire, aussi bien d'ailleurs que celle de la lune, ne s'étend pas seulement à la déclinaison, mais aussi à l'inclinaison et à l'intensité totale du champ terrestre[1]. Il ne semble pas déraisonnable, par ailleurs, d'admettre que les planètes et même les étoiles possèdent également un pouvoir magnétique insensible pour nous, soit à cause de la distance, soit en raison de son peu d'intensité propre.

11. — Les observatoires magnétiques se sont du reste beaucoup développés à la fin du siècle qui vient de finir, et les Anglais, entre autres, en ont créé dans presque toutes leurs colonies, c'est-à-dire qu'il en existe dans le monde entier. Les statistiques que ces établissements accumulent ne tarderont sans doute pas à élucider le détail des phénomènes dont les grandes lignes sont connues.

Outre les variations régulières dont nous avons parlé (variations diurnes), il s'en trouve d'autres moins importantes, mais qui méritent d'être signalées. La direction de l'aiguille aimantée présente, en premier lieu, une période annuelle ; c'est-à-dire que l'amplitude de l'oscillation diurne se compose de deux éléments :

devant la Société bohémienne des sciences, et confirmée depuis avec quelques modifications par *Sabine*.

[1] L'inclinaison de l'aiguille aimantée jointe à sa déclinaison et à l'intensité du champ suffisent à définir complètement la force magnétique terrestre.

l'un constant, l'autre dépendant de la déclinaison du Soleil. Ces deux mouvements s'ajoutent ou se retranchent, suivant que le Soleil est dans le même hémisphère que l'aiguille ou dans l'hémisphère opposé. Il y a de plus une variation séculaire très lente et d'autres encore, à périodes plus ou moins longues, mais de moindre amplitude, sur lesquelles nous n'insisterons pas.

12. — Maintenant que nous avons exposé les faits généraux avec leur enchaînement historique, il reste à leur trouver une explication, ce qui semble *a priori* malaisé.

Nous allons passer à l'examen des principales hypothèses proposées, ainsi que des détails fournis par l'observation sur lesquels on a cru pouvoir les fonder.

NATURE DE L'INFLUENCE MAGNÉTIQUE DU SOLEIL THÉORIE DE SCHUSTER

1. **Influence d'une tache isolée.** — Si, d'une manière générale, on ne doit pas espérer avant longtemps connaître la véritable origine, la cause intime du magnétisme cosmique, en revanche certains faits particuliers, d'une interprétation *a priori* plus aisée, peuvent jeter sur le problème quelque faible lumière.

On s'est souvent demandé, par exemple, si la présence d'une tache isolée ou d'un groupe de taches important avait une influence directe sur les perturbations magnétiques nous venant du Soleil[1]. Quelques

[1] Ou sur les aurores boréales qui en dépendent directement, autant que les observations permettent de le constater.

observateurs pensent que l'action solaire est plus forte lorsqu'un amas de taches et de facules passe au méridien central de l'astre. C'est ce que l'on nomme généralement la loi de *Marchand* [1], et elle est souvent vérifiée. Les avis sont cependant encore partagés sur cette question. On a cru trouver parfois une influence prépondérante des taches du bord est, tandis que d'autres astronomes, plus nombreux, et notamment *Tacchini* et *Lockyer*, estiment que la position de la tache n'a pas d'importance, mais que c'est plus haut, dans la chromosphère ou les protubérances, que sont les éléments actifs. Enfin le monde savant paraît assez disposé actuellement à admettre que les taches agissent plutôt un peu après leur passage au méridien central, — en moyenne 45 heures après, ce qui correspondrait à la propagation de faisceaux dirigés analogues aux rayons cathodiques (voir plus loin, pages 281 et 314).

2. — On a aussi recherché dans les perturbations l'existence d'une période égale à la rotation solaire : il semble bien que les orages magnétiques ont tendance à se reproduire après une ou plusieurs rotations, et des travaux très étendus ont été entrepris dans cette direction par *M. Maunder* [2]. Toutefois, la valeur de la période est loin d'être déterminée avec netteté et de nouvelles études seront sans doute nécessaires.

3. — Il est possible que si une tache ou une région solaire n'agissent pas par elles-mêmes, de brusques déplacements de la matière qui les constituent puissent

[1] *C. R.*, t. CIV, 1887, p. 135.
[2] *Monthly Notices*, t. LXV, 1905, pp. 2, 538, 666 et 813.

donner naissance à des orages magnétiques. Ce qui le donnerait à penser, c'est la célèbre observation de Carrington, souvent citée comme exemple de brusque perturbation solaire. Le 1er septembre 1859, *Carrington*[1] remarqua une vive lueur au milieu d'un groupe de taches; un instant après la lueur se déplaça, pour disparaître au bout de cinq minutes; elle avait parcouru pendant ce temps un trajet de 35000 milles anglais environ. Durant les trois jours qui précédèrent l'observation et durant les trois qui suivirent, un orage magnétique d'une extrême intensité passa sur le globe avec accompagnement d'aurores boréales jusque sous les tropiques. A l'instant précis de l'observation de Carrington, les trois éléments magnétiques éprouvèrent à l'observatoire de Kew des mouvements simultanés.

Comme l'a dit *Balfour Stewart*[2], le Soleil était pris « en flagrant délit »: ce qui, semble-t-il, avait réagi sur la terre, ce n'était pas la tache elle-même, mais la lueur et son rapide déplacement à la surface du Soleil.

Il en fut sans doute de même pour l'éruption solaire dont *Young*[3] fut le témoin et qui coïncida aussi avec de légères perturbations des appareils magnétiques (fig. 35).

Cependant, malgré les espérances que le phénomène avait fait naître, il ne fut plus réobservé dans des conditions entièrement analogues. M. *Hale*[4], notamment, vit en 1892 un point brillant se former en douze

[1] *Monthly Notices*, vol. XX, 1860, p. 13. Voir aussi Hodgson, p. 15, même volume.

[2] *Phil. Trans.*, vol. CLI, 1861, p. 428.

[3] *Le Soleil*, trad. franç., p. 124.

[4] *Trouvelot* a également fait à Meudon une observation du même genre (voir plus loin, p. 300).

minutes, au milieu d'une belle tache solaire, tandis que vingt-sept minutes plus tard le noyau de celle-ci était envahi par une vive lumière. Deux heures plus tard, tout était rentré dans l'état primitif, même le

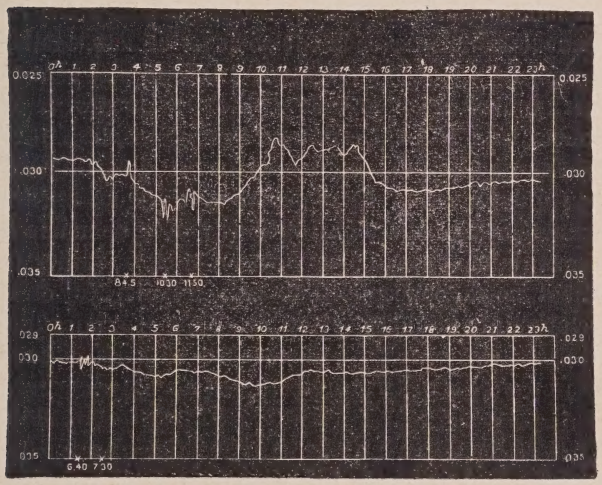


Fig. 35. — Courbes de la force verticale à Greenwich lors de l'éruption observée par Young les 3 et 5 août 1872.
(Les heures du paroxysme de l'agitation solaire sont notées.)

point qui avait disparu. Contrairement à l'exemple précédent, aucun orage magnétique bien net ne se montra le jour même, quoique le lendemain il y en ait eu un. Mais l'observation, d'ailleurs non isolée, était en lumière monochromatique et non *visuelle* comme celle de Carrington : on ne peut donc la lui comparer.

4. — Toutefois il est arrivé assez souvent que des

coïncidences aient été observées entre des anomalies spectrales ou des éruptions solaires, d'une part, et des perturbations de l'aiguille aimantée, d'autre part. Comme dans le phénomène de Carrington, il y a eu simultanéité dans presque tous les cas; on est donc amené à penser que les orages magnétiques nous parviennent du Soleil avec la vitesse de la lumière. Malheureusement, là encore, les observations ne sont pas assez nombreuses pour enlever tous les doutes. Il faut avouer qu'on ne peut guère prétendre élucider entièrement la question des influences magnétiques du Soleil, alors que l'on ne sait pas encore bien à quoi attribuer le magnétisme terrestre lui-même; l'idée que nous nous faisons de ce phénomène peut, en effet, modifier fortement notre conception de ses irrégularités et des perturbations qu'il peut subir. Nous sommes donc naturellement amenés à une courte digression sur la nature du champ terrestre.

5. **Digression sur la nature du champ terrestre.** — La pensée qui vient la première et paraît la plus simple consiste à admettre que la terre est un immense aimant permanent; cette hypothèse est cependant inadmissible, étant donné l'intensité du champ observé. Le siège de l'aimantation devrait, en effet, être situé fort près de la surface, alors que les matières composant en majeure partie la croûte terrestre sont très faiblement magnétiques. D'autre part, il est certain que les régions intérieures du globe sont à de très hautes températures, et l'on sait que tous les corps connus cessent d'être magnétiques dès qu'ils sont chauffés un peu fortement. Il faut donc renoncer

à expliquer le champ terrestre par un aimant proprement dit[1].

Aussi, est-on plutôt disposé aujourd'hui à faire jouer le principal rôle à des courants telluriques. Ces courants électriques, circulant de l'est à l'ouest à travers l'écorce terrestre dans le sens des parallèles, n'auraient pas besoin d'être très intenses pour expliquer les faits. D'ailleurs, les troubles que l'on constate assez souvent dans le fonctionnement des lignes télégraphiques suffisent à attester l'existence de courants telluriques notables; parfois même, sur les câbles transatlantiques, le service doit être complètement interrompu. Si l'on admettait que le magnétisme terrestre est en très grande partie dû à de pareils courants, il n'y aurait en outre aucune difficulté à expliquer les anomalies permanentes des éléments locaux; les inégalités dans la conductibilité des régions souterraines traversées produiraient précisément ces résultats.

6. **Objections de lord Kelvin à l'idée d'une action directe.** — Or tandis que d'un côté on était amené, en ce qui concerne notre globe, à renoncer à l'idée d'un aimant intérieur, il semblait, d'autre part, très difficile d'admettre que le Soleil pût avoir sur nos boussoles une influence directe. Le champ perturbateur qui, durant les orages magnétiques, nous vient de cet astre, se monte couramment à $\frac{1}{400}$ de la valeur du champ total, et peut parfois même atteindre $\frac{1}{30}$

[1] C'est là un fait très généralement admis; voir cependant là-dessus la théorie de *Bigelow*, p. 265.

ou $\frac{1}{20}$ de ce chiffre. Que l'on s'en tienne à l'hypothèse d'un Soleil aimanté et que l'on imagine un système de courants électriques solaires *fermés* équivalent, on est infailliblement conduit à attribuer au Soleil un moment magnétique énorme ; son ordre de grandeur est, comme on le sait[1], égal au champ produit multiplié par le cube de la distance, c'est-à-dire par $(15.10^{12})^3$; cela reviendrait à dire que l'intensité de l'aimantation devrait être 12000 fois plus forte que celle de la terre, chose difficile à admettre[2].

7. — Il y a plus : les brusques variations de l'aiguille durant les orages nécessiteraient, de la part de l'astre central, une dépense d'énergie extraordinaire ; la propagation d'un champ magnétique variable à travers l'éther a lieu, en effet, conformément aux idées de Maxwell et de Hertz, au détriment de l'énergie interne du corps rayonnant.

C'est ainsi que *lord Kelvin*[3] a choisi, par exemple, un orage d'intensité moyenne bien qu'assez long, qui fut signalé au même instant le 25 juin 1885 dans presque tous les observatoires du globe ; l'origine cosmique des perturbations n'était donc pas douteuse. Celles-ci, nombreuses et irrégulières, ont duré en tout huit heures ; la force horizontale seule présentait des

[1] Un aimant de moment M produit en effet, à une distance r, un champ magnétique d'intensité $\frac{M}{r^3}$ en laissant de côté un facteur numérique de l'ordre des unités.

[2] Lord Kelvin, *Proceedings of the Royal Society*, vol. LII, 1892, p. 307, et aussi *Nature*, t. XLVII, 1892-93, p. 106.

[3] *Loc. cit.*

anomalies atteignant $\pm$ 0,0005 unités C.G.S. en moyenne, et mettaient à s'établir dans chaque sens une moyenne de 25 minutes.

Ces données permettent de se rendre compte de l'énergie mise en jeu par l'aimant solaire hypothétique, rien que pour troubler la force horizontale. Le champ magnétique d'un petit aimant de moment M, en un point situé à une distance du centre r et dont le rayon vecteur fait avec l'axe un angle θ, est[1] :

$$H = \frac{M}{r^3}\sqrt{1+3\cos^2\theta}\ .$$

L'énergie du champ magnétique total en dehors de l'astre aimanté est alors égale à :

$$\int \frac{\mu H^2}{8\pi}\,dv$$

$$= \frac{1}{8\pi}\int_0^{\pi}\int_R^{\infty} 2\pi r^2 \sin\theta\, d\theta \frac{M^2}{r^6}(1+3\cos^2\theta)dr = \frac{M}{3R^3},$$

en appelant R le rayon du Soleil.

Si l'on donne, pour simplifier, à M sa valeur minimum (c'est-à-dire si l'on suppose la terre dans la direction de l'aimantation), on a :

$$M = \frac{r^3}{2} \times 0{,}0005,$$

ce qui donne avec $r = 214R$ une énergie totale de $0{,}69\ 10^{39}$ ergs[2]. Cette énergie devant être déployée en 25 minutes, celle dépensée par seconde est $4{,}6\ 10^{35}$ ergs.

Nous avons supposé l'observateur dans la direction où les perturbations seraient les plus fortes à énergie

1 O. Lodge, *Sur les électrons*, p. 24.

2 Schuster, *Monthly Notices*, 1905, t. LXV, p. 186.

égale. Lord Kelvin, qui sans doute n'a pas fait la même hypothèse et a peut-être pris d'autres données astronomiques, a cité sans démonstration le chiffre 12.10^{35} ergs par seconde que nous retiendrons, l'ordre de grandeur étant le même.

Autrement dit, non seulement l'énergie ainsi fournie pendant les huit heures de la durée de l'orage aurait dépassé de beaucoup celle que le Soleil nous envoie sous forme de rayonnement calorifique ($3{,}3\ 10^{33}$ ergs p. sec.), mais encore ces huit heures-là auraient été équivalentes à quatre mois de chaleur et de lumière au taux habituel.

8. **Théorie de Schuster.** — Que peut-on conclure de cela? Faut-il admettre avec *lord Kelvin* que toute action solaire directe doit être catégoriquement rejetée? Il semble bien que les calculs précédents sont exacts [1]. On ne voit peut-être pas *à priori* pourquoi il serait strictement impossible que le Soleil émette sous formes d'ondes brusques autant d'énergie qu'il en émet sous forme de vibrations lumineuses périodiques. En revanche il est incontestable que l'idée d'une action solaire directe s'est trouvée considérablement affaiblie par

[1] Ces calculs comportent cependant une restriction (*J. Bosler*, C. R., t. CXLIX, 1909, p. 722). Lord Kelvin a supposé l'existence d'aimants permanents ou, ce qui revient au même, de courants fermés dans le Soleil. Le champ est alors en raison inverse du *cube* de la distance. Mais d'autres phénomènes, par exemple une éruption solaire de matière électrisée, peuvent produire des champs magnétiques inversement proportionnels au *carré* de la distance. L'énergie dépensée est alors bien moindre, et l'argument de lord Kelvin perd sa valeur. Mais il faut ajouter qu'il y a vingt ans l'attention n'était pas encore attirée sur le genre de phénomènes auxquels nous faisons allusion.

le calcul de lord Kelvin. Aussi M. *Schuster* y renonce-t-il et préfère-t-il attribuer au Soleil, dans le phénomène qui nous occupe, un rôle indirect.

9. — D'après le savant professeur anglais, les orages magnétiques sont dus à des courants électriques circulant dans la haute atmosphère. La conductibilité des couches élevées est pourtant insignifiante : aussi l'idée de pareils courants, émise jadis par Balfour Stewart, n'avait-elle eu aucun succès. Mais les recherches modernes ont établi que, dans certaines conditions, les gaz pouvaient devenir conducteurs de l'électricité, même pour des forces électromotrices très faibles : on dit alors qu'ils sont ionisés. La lumière ultra-violette, les rayons Röntgen, la présence de corps radio-actifs peuvent, par exemple, les amener dans cet état. Il est donc permis d'admettre que sous l'action ionisante des rayons solaires, — par un mécanisme que l'on conçoit parmi ceux énumérés sans trop oser le préciser, — les hautes régions de l'air sont susceptibles de devenir plus ou moins conductrices, et par suite de donner passage à des courants électriques d'intensité variable. Telle serait l'origine des orages magnétiques. L'explosion toujours soudaine d'un de ces orages rappellerait une expérience bien connue due en principe à Hertz. Si l'on écarte les électrodes d'une bobine d'induction juste assez pour que la décharge ne passe plus, et si l'on place dans le voisinage un peu de radium, l'étincelle ne tarde pas à éclater brusquement sous l'influence ionisante du corps radio-actif; une source de lumière ultra-violette produit identiquement le même effet.

10. **Réponse à une objection.** — Avant de continuer, il est indispensable d'aller au-devant d'une objection évidente. On pourrait se demander, en effet, à quelle source peut bien être empruntée l'énorme quantité d'énergie nécessitée par les orages magnétiques, — puisque le Soleil n'a plus dans le phénomène qu'un rôle accessoire de déclanchement, — M. Schuster répond que l'énergie dépensée provient de la force vive de la rotation terrestre.

Il reprend à cet effet[1] le calcul de lord Kelvin avec les mêmes données ; il trouve qu'en attribuant les perturbations à des courants circulant dans l'atmosphère terrestre supposée mince par rapport au rayon a de la terre, l'énergie nécessitée par l'orage du 25 juin 1885 serait :

$$\frac{1}{3} a^3 H^2,$$

soit $2{,}15\ 10^{16}$ ergs par seconde : on voit que c'est beaucoup moins que ne l'exigerait une action directe du Soleil.

Or la force vive de la terre est 26×10^{35} ergs, et un calcul simple montre que cette force vive suffirait à alimenter annuellement 100 orages magnétiques de forte espèce, et cela durant 1 million d'années, sans que malgré tout le mouvement de la terre se ralentisse de plus de 1^s par an. Et on le conçoit sans peine, car l'orage que nous citions tout à l'heure a mis en œuvre, pendant les 25 minutes de son paroxysme, 2 000 fois moins d'énergie que n'en possède dans sa rotation une couche atmosphérique de $0^m{,}1$ d'épaisseur. On serait donc mal venu à contester l'efficacité de cette source

[1] Schuster, *loc. cit.*

d'énergie par des arguments empruntés à la mécanique céleste et à la constance du jour sidéral.

11. — Quant à la transformation de cette force vive en énergie électromagnétique, elle s'effectue par l'intermédiaire des courants d'induction qui prennent naissance quand des masses atmosphériques se déplacent au sein des lignes de force du champ terrestre ; tout mouvement relatif de la terre et d'une partie un peu considérable de son atmosphère a donc pour conséquence la production de courants qui peuvent agir sur nos boussoles ; c'est, au fond, l'expérience du disque de Foucault.

12. — **Suite de la théorie.** — M. Schuster a également cherché à expliquer les variations régulières du magnétisme terrestre dépendant du Soleil, notamment la variation diurne et la variation semi-diurne. Ces fluctuations proviendraient directement des oscillations correspondantes de la pression barométrique. Les mouvements horizontaux de l'atmosphère qui font varier cette dernière fournissent en effet, sous l'influence de la composante verticale du magnétisme terrestre, des courants électriques capables de rendre compte des faits ; bien entendu le calcul de ces courants est dans une large mesure hypothétique, et en tout cas assez laborieux pour peu que l'on veuille suivre l'observation.

La variation annuelle serait liée à l'action ionisante du Soleil, plus forte en été qu'en hiver.

13. — On peut se demander quelle doit être la conductibilité électrique de l'air pour expliquer la grandeur des changements magnétiques. Les calculs de

M. Schuster lui ont donné, pour le produit de la conductibilité par l'épaisseur de la couche conductrice, le nombre 3.10^{-6}; si l'on admet que l'atmosphère s'étend à une hauteur de l'ordre de 300 kilomètres, on trouve que la conductibilité, en unités électromagnétiques, a une valeur moyenne de 10^{-13}. Ce nombre, si faible qu'il soit, est cependant très grand comparé avec la conductibilité de l'air ordinaire, qui est approximativement de 10^{-24}; mais l'expérience montre que la conductibilité croît en raison inverse de la pression, pourvu que l'action ionisante reste invariable.

A une hauteur où la pression atmosphérique n'est plus que de 1 millième de millimètre de mercure, la conductibilité devrait être de l'ordre de 10^{-18}, ce qui serait encore fort insuffisant. Cependant, au sein d'un gaz ionisé, les ions se recombinent constamment malgré qu'il s'en produise sans cesse de nouveaux, et ce phénomène nuit beaucoup à l'augmentation de la conductibilité électrique. M. Schuster est donc disposé à admettre que la recombinaison des ions est d'autant plus lente que la température est plus basse; ce qui s'appliquerait principalement aux hautes régions de l'atmosphère. Malgré tout il faut accepter l'idée d'une ionisation extrêmement intense dans ces régions, ionisation qui ne peut venir que du Soleil. Du reste, les parties élevées de notre atmosphère sont évidemment les plus exposées à l'action solaire; il semble même certain que la lumière ultra-violette, si aisément absorbée par l'air et qui nous arrive cependant jusque vers λ 300, doit agir en ces régions avec une violence que peut-être nous ne soupçonnons même pas. Mais on doit convenir que c'est là une hypothèse, tout comme

l'opinion de l'auteur sur la lenteur des recombinaisons d'ions gazeux aux basses températures. Les courants atmosphériques nécessités par cette explication laissent aussi singulièrement place à l'arbitraire.

14. — M. Schuster l'a dit lui-même[1] : « Une théorie en physique ne vaut rien si on ne peut pas prouver qu'elle est fausse ; je veux dire qu'une théorie doit être suffisamment bien définie pour nous permettre de tirer des conclusions nettes qui peuvent être mises à l'épreuve. Si une théorie est assez vague pour nous offrir toujours une porte de sortie dès que nous trouvons un fait qui n'est pas tout à fait en accord avec elle, sa valeur disparaît au point de vue philosophique. » Là-dessus l'auteur indique quelques moyens de vérification qui nécessitent, pour être utilisés, un certain progrès de nos connaissances. Mais s'il est permis de signaler les points faibles d'une explication d'ailleurs encore à l'étude, il faut cependant réfléchir à la difficulté d'en trouver une meilleure, et notamment de se passer des courants induits dans l'atmosphère terrestre. Nous allons bientôt voir à quelles complications ont été amenés, dans les détails, quelques-uns des savants qui ont prétendu faire mieux.

THÉORIE MAGNÉTIQUE DE BIGELOW

1. — Parmi les hypothèses émises pour expliquer les relations du magnétisme terrestre avec les taches solaires, il n'y en a guère, nous l'avons vu, que deux qui soient à retenir : l'action magnétique directe du

[1] *Bulletin des séances de la Société de physique*, 1907, p. 283.

Soleil sur la terre et l'existence de courants de convection circulant dans les hautes régions de notre atmosphère. M. *Bigelow*[1] se déclare nettement pour la première. Ce n'est pas qu'il nie absolument la possibilité de courants électriques dans l'atmosphère, mais il pense que cette idée ayant surtout été adoptée faute de mieux, l'on rejette ordinairement l'autre sans motifs suffisants.

2. — On a objecté, notamment, que la haute température du Soleil ne permet pas de le supposer magnétique, étant donné que nous n'observons jamais de propriétés magnétiques chez les corps fortement chauffés. Mais la terre elle-même constitue une exception à l'expérience, puisque d'après toutes les indications géologiques son intérieur est à une température très élevée; et cependant elle est le siège d'un champ magnétique. L'argument n'est pas sans réplique, car c'est justement à cause de la chaleur centrale que l'on a abandonné l'idée d'un globe terrestre aimanté dans la masse. Il vaut mieux dire que l'on ne saurait assimiler les corps célestes à des aimants ordinaires en acier; les conditions physiques y sont si différentes de celles que nous connaissons que les résultats forcément limités de nos expériences ne sont peut-être plus valables.

3. — Beaucoup de savants (*Balfour Stewart*[2], et plus tard *Schuster*, entre autres) préfèrent adopter l'hypothèse des courants atmosphériques de convection. Malheureusement, quand on entre dans le détail, les

[1] Frank H. Bigelow, *Abstract of a report, etc. U. S. Weather Bureau*, Bulletin nº 21. Washington, 1898.

[2] Article « Meteorology » de l'*Encyclopædia Britannica*.

courants qu'il faut imaginer pour rendre compte des faits forment un système des plus compliqués. En outre de la difficulté de concevoir comment de tels courants pourraient prendre naissance dans un milieu aussi peu conducteur que l'air, il semble peu logique d'attribuer à une pareille cause des variations dont les périodes sont purement astronomiques, c'est-à-dire dépendent des positions relatives de la terre et du Soleil. Une fois d'ailleurs que l'on croit avoir trouvé un système de courants à peu près satisfaisant, il est presque impossible de le faire cadrer avec les courants atmosphériques observés par les météorologistes. Aussi s'en tient-on, en général, à la vague notion des courants atmosphériques, notion que l'on se garde bien d'expliciter davantage.

4. **Le « Soleil aimanté »**. — M. Bigelow considère donc le Soleil comme un immense aimant sphérique. Pour la commodité des raisonnements, il suppose l'astre uniformément aimanté dans toute sa masse. Le Soleil sera donc environné de lignes de force qui atteindront la terre. Si nous supposons l'aimantation dirigée suivant l'axe de rotation, les lignes de force seront, vu la distance de la terre et vu la faible inclinaison de l'équateur solaire, à peu près perpendiculaires à l'écliptique; de plus le champ sera, dans toute la région voisine de notre planète, sensiblement uniforme.

5. — En dehors de ce champ magnétique, le Soleil nous envoie en grande abondance des ondes électromagnétiques périodiques extrêmement rapides qui, d'après Maxwell, constituent sa lumière ou plutôt sa

radiation énergétique visible ou invisible. Dans sa théorie primitive, M. Bigelow faisait jouer un rôle important à ces ondes[1]. Il y a renoncé depuis : il se contente, comme nous le verrons[2], de les faire intervenir moins directement.

6. **Discussion des observations.** — Afin de reconnaître l'action possible du champ magnétique solaire, M. Bigelow examine l'ensemble des observations accumulées depuis une cinquantaine d'années dans les vingt-six principaux observatoires magnétiques du globe. Ces statistiques ne donnent en général que les valeurs de la force horizontale, de la force verticale, de la résultante, de la déclinaison et de l'inclinaison magnétiques, jour par jour et heure par heure. Mais il est rare que l'on remonte aux vecteurs perturbateurs eux-mêmes envisagés à la fois en grandeur et en direction dans l'espace; or ces vecteurs sont seuls intéressants, et c'est là l'erreur fondamentale qui, d'après M. Bigelow, embrouille toute la question. De plus, on persiste à diviser arbitrairement l'année d'après les mois du calendrier, qui n'ont rien à voir avec le Soleil, ni même avec la terre.

L'étude des observations permet à M. Bigelow de reconnaître dans les variations une période égale à la durée de rotation du Soleil sur lui-même; le chiffre qu'il trouve par ce procédé est $26^{j},679$, chiffre fort voisin de la période synodique obtenue par *Carrington, Spörer, Faye,* en général par ceux qui se sont occupés, en suivant d'autres méthodes, de la rotation solaire.

[1] Dans le Mémoire de 1898 (*Abstract of a report, etc.*).
[2] Page 274.

Les statistiques fournissent ensuite pour chaque station les vecteurs moyens annuels du champ troublant; on les déduit des moyennes annuelles de la variation diurne, et si l'on construit dans l'espace, sur une sphère, la série des vecteurs obtenus AB, A_1B_1, A_2B_2, on s'aperçoit qu'ils sont, à peu de chose près, compris dans les méridiens magnétiques, et offrent pour la terre entière l'apparence ci-contre (fig. 36); la courbe fermée représentée ici est le lieu des extrémités des vecteurs. Le résultat obtenu suggère aussitôt, on le voit, l'idée d'une déformation d'un champ cosmique uniforme, — le champ solaire dont nous avons parlé, — par une couche terrestre perméable au magnétisme.

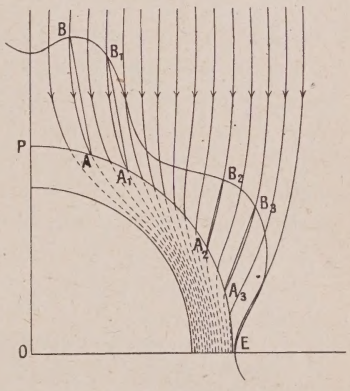


Fig. 36.

7. — Après quelques tâtonnements, M. Bigelow en arrive à la conclusion suivante : les observations sont assez bien représentées si l'on suppose la terre formée d'un noyau entièrement imperméable au magnétisme, recouvert d'une couche perméable; l'épaisseur de celle-ci devrait être le 1/5e du rayon et son coefficient de perméabilité égal à 2. Dans ces conditions, la figure théorique (fig. 37) qui représente l'effet d'une pareille couche sur les lignes de force d'un champ

magnétique uniforme, et dont les courbes ont été calculées analytiquement, coïncide presque exactement avec celle fournie par l'observation.

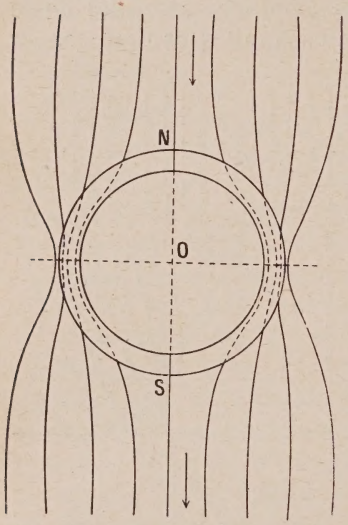


Fig. 37. — Effet d'une couche perméable sur un champ magnétique uniforme.

Malheureusement il n'en est pas de même de la valeur en chaque point de la terre du champ magnétique étranger admis ici; le lieu des extrémités des vecteurs qui représentent ce champ, loin de présenter de nombreux points d'inflexion, est une courbe beaucoup plus régulière (fig. 38) que celle tirée des statistiques. Alors que cette dernière a un maximum vers les latitudes $\pm 30°$ et un minimum vers $\pm 60°$, la courbe théorique montre que le champ est maximum près des pôles et minimum à l'équateur. Ce désaccord a été opposé à la théorie de Bigelow, et il faut convenir qu'il n'est guère facile de le faire disparaître, même au prix de nouvelles hypothèses.

8. — M. Bigelow pense qu'il doit y avoir un autre effet qui se superpose au premier : un champ secondaire (fig 38, trait pointillé) dû à des courants élec-

triques atmosphériques viendrait dans les latitudes moyennes diminuer le vecteur solaire normal. On nous excusera de ne pas insister sur les nombreuses hypothèses souvent hasardeuses que l'auteur est obligé

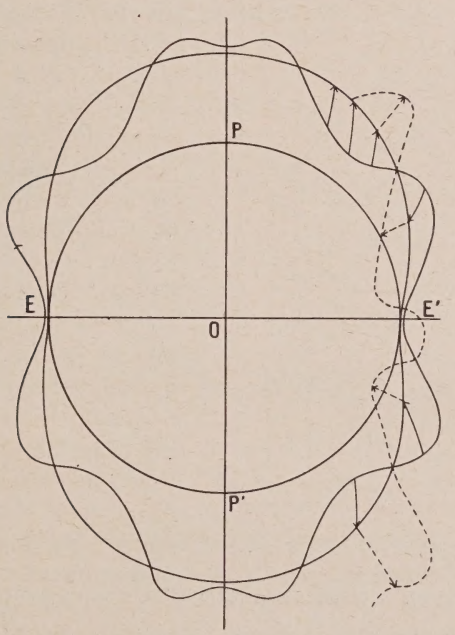


Fig. 38.

d'appeler à son aide pour écarter ce point faible de sa théorie. Il y a là incontestablement une lacune qui n'est pas près d'être comblée.

9. **Forme des lignes de force.** — M. Bigelow est sur un terrain plus solide lorsqu'il se propose de

rechercher la forme exacte théorique des lignes de force du champ solaire. Il est assez aisé, en effet, de l'obtenir, soit analytiquement, soit géométriquement (fig. 39). Si l'on suppose l'astre uniformément aimanté,

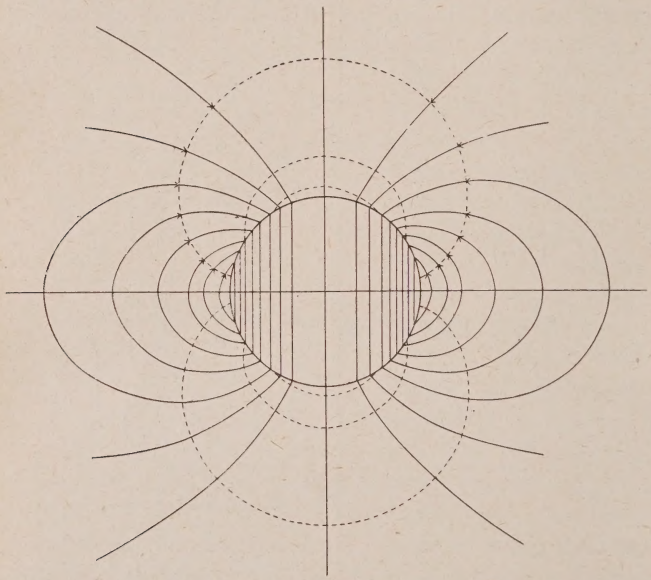


Fig. 39. — Champ d'une sphère uniformément aimantée.

le champ est uniforme à l'intérieur; à l'extérieur les lignes de force rappellent celles d'un doublet de deux pôles opposés très voisins, c'est-à-dire d'un aimant infiniment court. L'apparence du champ solaire (fig. 39) est d'ailleurs analogue à celle du champ terrestre lui-même, et, à la distance de la terre, ce champ est bien sensiblement normal à l'écliptique. Ajoutons que le

pôle nord du Soleil doit être, d'après M. Bigelow, aimanté positivement et le pôle sud négativement; le moment magnétique qui, pour la terre, est $8{,}55\ 10^{25}$ C.G.S. doit atteindre pour le Soleil $1{,}168\ 10^{36}$ C.G.S., ce qui correspond à une intensité d'aimantation 824,0;

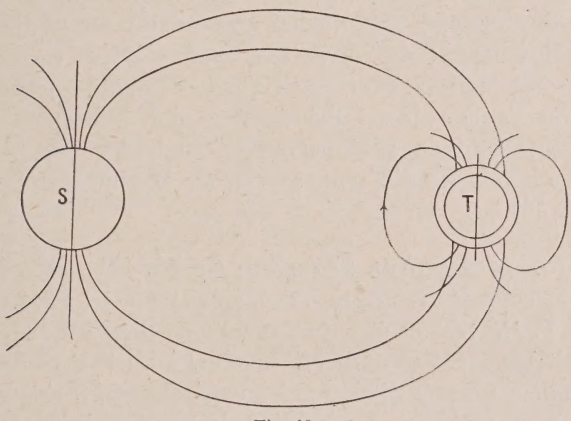


Fig. 40.

ces chiffres sont déduits[1] de la valeur moyenne adoptée par M. Bigelow pour le champ troublant 0,00035 C.G.S.

Il est impossible de ne pas rapprocher la forme du champ solaire de l'aspect présenté par la couronne, surtout aux époques de minimum d'activité[2]; c'est

[1] Voir aussi, outre le Mémoire de 1898 cité : *Astronomy and Astrophysics*, vol. XII, 1893, p. 717.

[2] M. Bigelow a étudié ces formes de la couronne en 1889 dans un Mémoire intitulé *The Solar corona discussed by Spherical Harmonics*. — Un peu plus tard il arriva à cette conclusion que

surtout vers les pôles du Soleil que l'analogie est frappante. De là à considérer la couronne comme une sorte de spectre magnétique où des poussières coronales faiblement magnétiques remplaceraient la limaille classique, il n'y a qu'un pas, et M. Bigelow, qui le franchit sans peine, trouve naturellement dans cette explication aisée un nouvel argument pour sa thèse. Ici les expériences de laboratoire exécutées en Allemagne par *Ebert*, et en Amérique par *Pupin*, apportent, selon l'auteur, à la théorie une aide précieuse; ces savants sont en effet parvenus à reproduire dans un tube à vide les différents aspects de la couronne (Voir fig. 42).

10. **Idées plus récentes de M. Bigelow.** — Cependant les recherches modernes de *J. J. Thomson*, *C. T. R. Wilson* et autres sur l'ionisation du gaz ont ultérieurement conduit M. Bigelow à interpréter d'une manière un peu différente les expériences précédentes[1] et à se rapprocher des idées de M. *Arrhénius*, idées que nous développerons un peu plus loin. Ce ne seraient plus les particules coronales elles-mêmes qui seraient magnétiques à proprement parler; mais on pourrait expliquer les phénomènes observés de la façon suivante.

La photosphère est le siège de décharges électriques puissantes qui ionisent certaines portions de sa masse, c'est-à-dire en libèrent de petites particules chargées

les particules coronales étaient repoussées par une force variant en raison inverse du carré de la distance. Ce n'est que dix ans après qu'il précisa et attribua cette force au magnétisme.

[1] *Amer. Journal*, vol. XI, 1901, p. 253.

d'électricité; ces particules qui donnent naissance aux filaments coronaux repoussés par la pression *Maxwell-Bartoli*. Le noyau solaire est, d'autre part, M. Bigelow croit l'avoir démontré, fortement aimanté, quelle que soit d'ailleurs la cause initiale de cette aimantation. Le champ magnétique qui en résulte a son axe parallèle à l'axe solaire, et, conformément à l'expérience d'Ebert, il repousse les ions des régions polaires, ce qui explique la rareté relative des rayons coronaux un peu longs dans ces régions.

On a constaté de plus que, vers les régions équatoriales du Soleil, les rayons ont tendance à s'écarter les uns des autres, à quitter la surface en divergeant. Il peut y avoir là, dit M. Bigelow, un phénomène analogue à la répulsion cathodique des tubes à vide. Combinée avec l'effet précédent, cette répulsion donne à la couronne la structure synclinale qu'on lui a souvent trouvée (voir fig. 41). Nous devons ajouter que la répulsion des rayons cathodiques n'est qu'une apparence qui a été reconnue être due seulement à l'électrisation des parois du tube; il ne pourrait guère y avoir ici que la divergence résultant de la forme sphérique du Soleil auquel les rayons seraient normaux.

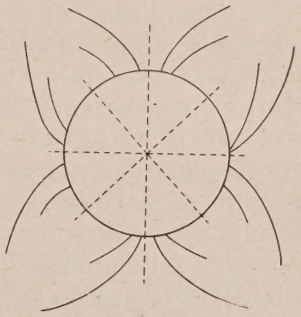


Fig. 41.

De plus, d'après M. Bigelow, toute la masse solaire doit être fortement ionisée par sa haute température,

par les décharges accidentelles, par les rayons ultra-violets, etc., et les électrons négatifs étant plus mobiles que les ions positifs doivent tendre à s'échapper, ce qui occasionne une charge électrostatique superficielle de l'astre entier. Celle-ci se superpose à la pression de radiation et peut engendrer des effets du même ordre.

Toutefois il est impossible d'affirmer que les ions solaires libérés atteignent les couches supérieures de notre atmosphère en assez grande abondance pour faire varier le magnétisme terrestre, ainsi que les champs électriques enregistrés près de la surface du sol. M. Bigelow considère comme fort improbable qu'il en soit ainsi; ces phénomènes ne sauraient suppléer à l'action du champ magnétique solaire.

11. — Quant aux variations constatées de l'aiguille aimantée, la théorie de Bigelow les explique, en définitive, de la façon suivante.

Les variations diurnes (au cours de la journée) sont les plus difficiles à interpréter. M. Bigelow avait d'abord songé à la rotation de la terre autour de son axe, rotation qui change les composantes du champ terrestre normal par rapport aux lignes de force du champ solaire électromagnétique[1]. Il a abandonné depuis cette théorie singulière pour attribuer les écarts aux déplacements des ions atmosphériques, autrement dit à des courants électriques aériens[2]; c'est la théorie de *Schuster*.

[1] Il s'agit ici du champ magnétique périodique qui, superposé à un champ électrique de même période, donne naissance aux ondes lumineuses dans la théorie de *Maxwell*. Ces spéculations occupent une partie du Mémoire de 1898 déjà cité.

La *période solaire* de 26,68 jours est causée par la rotation du Soleil qui, en entraînant le champ magnétique coronal, nous présente tour à tour des régions différentes de ce champ. M. Bigelow ne considère pas, en effet, le champ coronal comme identique dans tous les méridiens solaires; il peut, au contraire, avoir des valeurs différentes selon la position de la terre.

La période annuelle vient du changement d'aspect du système magnétique solaire tout entier par suite de la variation de déclinaison du Soleil avec les saisons, l'inversion semi-annuelle des phénomènes devant naturellement se produire comme conséquence de changement de position de la terre.

La période undécennale est attribuée à de lents mouvements des masses magnétiques à l'intérieur du noyau solaire. De brusques variations du moment magnétique solaire causeraient les *perturbations*.

Les périodes séculaires sont moins bien connues; elles peuvent venir d'une lente redistribution de magnétisme dans l'intérieur de la terre. De plus, les très longues périodes que peut avoir le Soleil en tant qu'étoile variable ne sont peut-être pas sans influence.

12. — Nous ne pouvons passer entièrement sous silence une des principales applications de la théorie de Bigelow, en vue de laquelle elle a peut-être été conçue, au moins au début[1]. Nous voulons parler des essais de prévision du temps. Ces essais n'ont pas, en

[2] *Popular Astronomy*, janv. 1906, vol. XIV, p. 37, et *Monthly Weather Review*, nº 8, 1905, p. 357.

général, eu beaucoup de succès ; il s'agit là de questions fort controversées. On n'est même pas d'accord sur les faits fondamentaux servant de base aux recherches ; aussi ne nous étendrons-nous pas davantage sur une tentative qui sort d'ailleurs de notre sujet.

13. — En définitive, la théorie de Bigelow paraît à première vue assez séduisante et assez naturelle ; mais dans les détails elle met en œuvre un nombre excessif d'hypothèses souvent hasardées. Elle a de plus contre elle l'argument de lord *Kelvin*[2] tiré de l'énormité de l'énergie que le Soleil devrait dépenser pour entretenir une perturbation magnétique notable. M. Bigelow ne semble pas s'inquiéter de cet argument, bien qu'il essaie de répondre à un autre du même lord *Kelvin*. L'intensité d'aimantation (quotient du moment magnétique total par le volume), qui devrait être de 10000 fois l'aimantation terrestre pour les orages peu intenses, atteindrait 150000 fois ce chiffre, soit 8,5 fois celle de l'acier trempé, dans les perturbations violentes. M. Bigelow considère que cela prouve qu'il faut reviser tout simplement nos idées sur l'état magnétique de la matière solaire ; il est cependant difficile de méconnaître la gravité de l'objection.

[1] F. Bigelow, *Storms, Stormtracks, etc. U. S. Weather Bureau*, Bulletin nº 20.

[2] Voir plus haut, p. 257.

LA THÉORIE CATHODIQUE

1. **Premières recherches de Goldstein, Paulsen et Birkeland.** — L'idée de la possibilité d'une émission de rayons cathodiques par le Soleil a d'abord été proposée par *Goldstein*, en 1881[1]. Les rayons cathodiques n'avaient pas alors été découverts depuis bien longtemps, et leur introduction dans la science semblait déjà pleine de promesses à quelques précurseurs. Goldstein, entre autres, pensa qu'il y aurait là peut-être la clef de l'influence mystérieuse exercée par le Soleil sur les phénomènes électriques ou magnétiques terrestres.

Ces phénomènes pourraient, en effet, s'expliquer par des courants de convection électrique qui traverseraient l'espace interplanétaire et émaneraient de la masse centrale. On sait, par des expériences de laboratoire, que la raréfaction extrême du milieu favorise considérablement la propagation indéfinie des rayons cathodiques; il paraît donc tout à fait admissible que le Soleil, outre les rayons lumineux ordinaires, de nature ondulatoire, émette aussi des corpuscules négatifs. Il semblerait toutefois, à première vue, qu'une électrode positive extérieure soit nécessaire à la production du rayonnement; mais l'expérience constate que celui-ci est indépendant de la position de l'anode dans le tube de Crookes : les rayons se propagent en ligne droite, normalement à la cathode, et cela tant qu'ils ne sont pas absorbés par un

[1] *Wiedemann Annalen*, t. XII, 1881, p. 266. — *C. R.*, 1898, t. CXXVI, p. 1201.

milieu matériel[1]. Il n'est donc pas indispensable, pour qu'une communication de cette nature ait lieu entre le Soleil et la terre, que cette dernière représente elle-même une électrode positive, et il peut fort bien se faire que des décharges, dont les deux pôles se trouveraient dans le Soleil, inondent les espaces célestes de corpuscules cathodiques.

2. — Quelques années après le travail de Goldstein, *Adam Paulsen*[2], frappé par les analogies que présente la lumière des aurores boréales avec celle excitée dans l'ampoule de Crookes, attribua ces météores à des rayons cathodiques localisés dans l'air raréfié de notre haute atmosphère, sans spécifier davantage la cause de leur production. Mais un mémoire expérimental de M. *Birkeland*[3] vint bientôt préciser sur ce point les idées des savants : l'auteur y décrivait, en effet, le premier le phénomène de la succion des rayons cathodiques par un pôle magnétique intense. On sait que si un faisceau de rayons cathodiques est soumis à l'action d'un champ magnétique, les trajectoires de ceux-ci sont déviées de façon à s'enrouler autour des lignes de force, conformément à la loi laplacienne (effet d'un champ magnétique sur un élément de courant). Dans le voisinage d'un pôle magnétique intense, les lignes de force viennent converger en ce point et l'on conçoit

[1] Au moins pourvu qu'ils ne rencontrent pas sur leur passage un champ magnétique ou électrique susceptible de les dévier.

[2] *Bulletin de l'Académie des sciences de Copenhague*, 1894, et *Meteorologische Zeitschrift*, t. II, 1894, p. 450.

[3] *Arch. des sciences physiques et naturelles*, 101e année, 4e période, 1896, Genève, p. 497.

que les rayons paraissent violemment attirés, sucés même par le pôle.

3. — La grande difficulté dans la théorie de Paulsen était de savoir pourquoi les rayons invoqués par lui se produisaient surtout dans les régions voisines des pôles magnétiques terrestres, et aussi, comme nous l'avons dit, d'où provenait le rayonnement. Birkeland pense que l'on peut admettre que les rayons viennent du Soleil, d'une manière ou d'une autre. De cette façon on s'expliquerait les variations journalières de l'aurore boréale, son apparition fréquente dans les régions polaires, et aussi la coïncidence si remarquable entre la période undécennale de l'activité solaire et celle des aurores boréales.

Il convient de dire que M. *Birkeland* se contente, dans son mémoire, d'énoncer l'hypothèse indiquée ci-dessus sans l'étayer de preuves tirées de l'étude du Soleil lui-même. C'est M. Deslandres qui, conduit vers la même époque à adopter dans cette voie des idées analogues, les introduisit dans la physique solaire en appliquant les phénomènes cathodiques à l'explication de la couronne[1].

4. **Théorie de M. Deslandres.** — M. Deslandres considère tout d'abord comme certaine l'origine électrique des protubérances et de la chromosphère solaires. En effet, ces régions du Soleil émettent de nombreuses raies de l'hydrogène réunies entre elles

[1] *Observations de l'éclipse totale du 16 avril 1893.* Paris, Gauthier-Villars, mars 1896, et *Annales du Bureau des Longitudes*, t. V, 1907. Voir aussi sur toute la théorie traitée ici : *Ions, Électrons, Corpuscules*, t. I (Mémoires publiés par la Société de physique, p. 153).

par la formule de *Balmer;* or, ces raies, la chaleur seule ne les donne pas, quelque haute que soit la température employée, alors que l'étincelle électrique les fournit facilement. Ce fait remarquable a conduit M. Deslandres à attribuer aux raies chromosphériques une origine électrique, et il est, à cet égard, beaucoup plus probant que toutes les analogies de formes mises en avant pour rapprocher les protubérances de divers phénomènes électriques naturels (des aurores boréales, par exemple). La preuve spectrale précédente s'étend sans peine à la chromosphère entière qui ne se distingue pas par son spectre des protubérances, et dont celles-ci ne sont d'ailleurs que des anomalies locales.

5. — La nature de la chromosphère étant ainsi supposée connue, l'étude de la couronne doit être, par là même, plus facile. Comme la couronne nous montre également les raies de l'hydrogène, bien que très affaiblies, nous pouvons en conclure que son illumination provient de causes électriques. Il est vrai que, si la couronne était entièrement gazeuse, les couches inférieures seraient comprimées par rapport aux supérieures, comme dans notre propre atmosphère, et la pression de ces dernières devrait être extraordinairement faible, ce qui les empêcherait d'être conductrices; de plus, près du Soleil, les raies coronales ne sauraient être aussi fines que nous les voyons. Pour répondre à cette objection, M. Deslandres se rallie là-dessus à l'hypothèse de *Sir William Huggins*[1], d'ailleurs souvent admise

[1] *Proceedings of the Roy. Soc.,* vol. XXXIX, 1885, p. 108. — Voir aussi dans ce volume, à propos de la thèse de M. Nordmann, d'autres interprétations.

aujourd'hui. La couronne serait formée de petites particules solides incandescentes qui donneraient lieu à un spectre continu : ces particules devraient simplement leur haute température au voisinage de la photosphère et aussi à un rayonnement cathodique qui, émis par la chromosphère supérieure, aurait pour effet de les rendre phosphorescentes. C'est autour de ces parcelles solides que se trouveraient les gaz de la couronne, formant à chacune d'elles une sorte de petite atmosphère propre ; celles-ci, illuminées électriquement par les décharges cathodiques ou par induction, comme dans l'expérience classique des tubes de Geissler, pourraient avoir un spectre de raies brillantes : ainsi s'expliquerait, notamment, la raie verte du « coronium », la plus intense de la couronne.

6. — Pour bien comprendre le phénomène, M. Deslandres en cherche un correspondant sur la terre en se laissant guider par l'idée philosophique suivante qu'il a ensuite développée de toutes les manières : Tous les corps célestes, soleils, planètes, comètes, et jusqu'aux nébuleuses doivent offrir les mêmes phénomènes, mais dans des proportions parfois très différentes, d'où la diversité des apparences [1]. M. Deslandres est ainsi conduit à rapprocher l'électricité solaire et l'électricité atmosphérique terrestre. On sait, en effet, que les couches supérieures de notre atmosphère sont chargées positivement par rapport au sol, et la différence de potentiel, d'ailleurs très variable selon les endroits et les époques, atteint de 10 à 100 volts par mètre. Cet

[1] C'est ainsi que, dans cet ordre d'idées, la Terre doit avoir une couronne comme le Soleil et une queue comme les comètes.

état électrique est général sur toute la terre ; si, comme il est naturel de le faire, on admet que le Soleil est le siège d'un champ analogue, il doit y causer une décharge lumineuse continue, décharge favorisée par la haute température et la plus grande conductibilité des gaz échauffés, ainsi que par la chute de potentiel, sans doute plus forte en raison des dimensions du Soleil. Le phénomène doit donc ressembler grandement à ceux que nous offre la chromosphère : dans les deux atmosphères, remarque d'ailleurs M. Deslandres, il est plus intense là où la surface est plus haute, — au-dessus des montagnes sur la Terre et au-dessus des facules dans le Soleil.

Il y aurait pourtant une différence : M. Deslandres admet que l'électrisation de l'atmosphère solaire est de sens contraire à celle de la nôtre[1]. Les couches supérieures de la chromosphère étant chargées négativement et à pression très basse, on se trouverait dans les conditions des tubes de Crookes et des décharges pourraient facilement avoir lieu. Les rayons cathodiques solaires, à peu près normaux à la surface, doivent naturellement être plus intenses aux points où la chromosphère est elle-même plus brillante, c'est-à-dire au-dessus des facules. Ces plages actives de la chromosphère illuminant par phosphorescence les poussières cosmiques répandues autour du Soleil, on s'expliquerait aisément les formes particulières des rayons coronaux. On sait en effet que la couronne présente des sortes

[1] Déjà Werner Siemens (*Berliner Berichte*, 1883, t. XXVI) et Arrhénius plus récemment (*Revue générale des sciences*, 1902, p. 69), par des voies différentes, étaient arrivés à la même conclusion.

de panaches, tantôt normaux à la surface, tantôt incurvés : les formes courbes seraient dues au champ magnétique solaire[1], et seraient analogues à la déviation des rayons cathodiques sous l'action d'un aimant. L'hypothèse de M. Deslandres permettrait encore de rendre compte de ce fait, que la raie verte de la couronne a la même intensité dans les rayons coronaux que dans leurs intervalles. En effet, dès que la distance au Soleil est un peu grande, l'éclat des petites atmosphères illuminées par induction doit être uniforme[2], tandis que les poussières elles-mêmes, qui brillent en partie par phosphorescence, ont des éclats très inégaux, variables avec les directions des jets cathodiques. Les rayons coronaux pourraient ainsi être rapprochés des queues cométaires, qui, vraisemblablement, ont la même cause[3]. Enfin, et surtout, l'existence de régions privilégiées sur le Soleil, régions correspondant aux taches, permettrait d'interpréter les relations de l'activité solaire avec le magnétisme terrestre.

7. **Développement de la théorie. Extension aux nébuleuses.** — Dans des notes plus récentes, M. Deslandres montre que sa théorie, grâce aux propriétés des rayons cathodiques, peut expliquer seule les phénomènes et s'étendre aux autres astres. Ainsi, tandis que la phosphorescence rend compte de l'éclat

[1] M. Bigelow a aussi admis un champ magnétique ; mais ici le champ est plus faible et supposé du même ordre que celui de la Terre.

[2] Observation de l'éclipse totale du 16 avril 1893, p. 71.

[3] *C. R.*, t. CXXVI, 1898, p. 1323. — Voir aussi *C. R.*, t. CXXIV, 1897, pp. 678 et 1297, t. CXXXIV, 1902, pp. 1134 et 1486, et t. CXL, 1910, p. 65, sur la théorie de Deslandres en général.

des rayons coronaux, leurs formes s'interprètent également par la répulsion bien connue que, dans le tube de Crookes, les rayons cathodiques exercent sur les corps qu'ils viennent frapper. On expliquerait de la sorte [1] sans aucune difficulté les queues des comètes : c'est d'ailleurs à la force répulsive du Soleil, quelle que soit son origine, cathodique ou autre, qu'on les attribue universellement aujourd'hui. La lumière des comètes serait alors, pour M. Deslandres, due à une phosphorescence d'origine cathodique ; les queues multiples pouvant provenir soit de la masse différente des particules repoussées, conformément aux idées de *Bredikhine,* soit de la division des rayons cathodiques solaires en rayons simples d'après leurs vitesses.

8. — M. Deslandres, tout en faisant remarquer que l'observation de la couronne est encore trop peu avancée pour que l'on puisse discuter à fond les diverses hypothèses émises sur sa constitution, indique une vérification possible de sa théorie. Les variations passagères d'éclat des comètes, variations qui, comme on sait, sont souvent brusques et sans rapport avec les

[1] Disons à ce propos que dans le tube de Crookes la répulsion cathodique n'est pas due, comme on pourrait le croire *a priori,* au choc direct des corpuscules cathodiques. Un calcul simple fait voir, en effet (J. J. Thomson, *Conduction of electricity through gases,* Cambridge, 1903, p. 501), que la quantité de mouvement ainsi communiquée est beaucoup trop faible pour être observée. Il y a là un effet radiométrique: le choc des rayons ne fait que chauffer le corps frappé, et ce sont les molécules mêmes du gaz raréfié qui fournissent l'impulsion nécessaire. Cependant pour des corps de plus en plus petits, la répulsion due au choc cathodique peut devenir notable, tandis que la pression de radiation va, au contraire, en diminuant et finit par s'annuler (voir p. 308).

changements de distance calculés, doivent correspondre au passage des fortes taches près de la ligne qui joint la comète au centre du Soleil. Tout récemment, la comète Morehouse (1908) est venue apporter à la théorie une aide indiscutable, mais par une autre voie : le spectre de sa queue est celui que certains gaz présentent sous l'action du rayonnement cathodique[1]. On doit aussi, semble-t-il, constater la correspondance avec les taches des jets coronaux les plus importants, qui, eux aussi, doivent se trouver au-dessus des régions de grande activité solaire.

En somme, en ce qui concerne la couronne et les comètes, la conception de M. Deslandres peut se rapprocher de celle de M. *Arrhenius* que nous résumerons plus loin. M. Deslandres lui-même admet l'action possible, suggérée par le savant suédois, de la pression *Maxwell-Bartoli* causée directement par la lumière et qui jouerait un rôle analogue à la répulsion cathodique, tout en ne soulevant pas les mêmes critiques[2].

9. — D'autre part la théorie a été étendue aux nébuleuses à l'aide des considérations suivantes. Un faisceau cathodique solaire émis par la chromosphère supérieure subit l'action du champ magnétique dû aux particules circulant à grande vitesse autour du Soleil, et que sa lumière ultra-violette électrise positivement. Il s'incurve alors[3] et devient comparable à une spire

[1] Fowler, *Monthly Notices*, t. LXX, 1909, p. 176. Voir aussi Deslandres, *C. R.*, 1908 et 1909 passim.

[2] Voir la note, p. 286.

[3] Cette courbure peut aussi expliquer le retard d'environ 45 heures que présentent assez souvent les orages magnétiques par rapport au passage d'une belle tache dans le méridien central.

de nébuleuse : la similitude est encore plus grande si l'on considère le cas, — qui se présente fréquemment, — de deux belles protubérances diamétralement opposées et des jets cathodiques correspondants. Que deux puissantes éruptions jaillissent ainsi d'une masse cosmique, au sein d'un champ magnétique, et l'on a une image de la nébuleuse spirale classique. Qu'une attraction extérieure plus ou moins constante entre en jeu, elle agira en sens opposé sur les deux spires, tout comme la lune dans la théorie élémentaire des marées le fait sur les océans; l'apparente fixité du phénomène sera dès lors assurée.

10. — Une objection grave a cependant été faite par M. Schuster contre l'idée d'une émission cathodique solaire. Si le Soleil inondait continuellement l'espace de corpuscules négatifs, il finirait par acquérir une charge positive suffisante pour arrêter toute nouvelle émission de rayons cathodiques. L'argument s'opposerait du reste également à une émission d'ions positifs, et nous devons reconnaître qu'il est des plus sérieux. Nous verrons plus tard comment Arrhenius y répond [1]; toutefois, aucune expérience ne peut être tentée pour l'instant sur ces matières, et l'objection n'a peut-être pas la force qu'elle paraît posséder. Le radium ne peut-il pas envoyer à une certaine distance des corpuscules négatifs, et cela durant des années, — des siècles même sans doute? Les corpuscules positifs correspondants sont, en effet, vite arrêtés par l'absorption du milieu, et au delà de 7 centimètres l'air ordinaire ne les laisse

[1] Voir p. 315.

plus passer. Nous ignorons si des phénomènes analogues n'ont pas lieu dans le Soleil.

On peut encore objecter que si l'illumination des corpuscules coronaux dépend de l'activité solaire dans la région des taches, l'extension des banderoles doit y être plus grande aux époques de maximum : or c'est le contraire que l'on observe. Il est juste d'ajouter que, d'après la loi de Spörer, les taches ont, aux époques de minimum, tendance à déserter les hautes latitudes.

LES THÉORIES HERTZIENNES OU ÉLECTROMAGNÉTIQUES

1. **Rôle possible des ondes hertziennes.** — Le domaine des recherches spectrales s'est beaucoup étendu dans ces derniers temps. On ne connaissait guère autrefois que les rayons lumineux visibles; la chaleur rayonnante était censée n'avoir rien de commun avec la lumière. Bientôt la découverte des rayons obscurs infra-rouges et ultra-violets est venue prolonger le spectre des deux côtés d'une manière continue, tandis que l'on apprenait à ne voir dans les diverses formes de l'énergie rayonnante qu'un seul et même phénomène. Toutefois, si la région ultra-violette inexplorée est délimitée (de $\lambda = 0\mu,1$ à $\lambda = 0$), au delà du rouge le spectroscope ne révèle plus rien après $\lambda = 60\mu$. Les ondes hertziennes, utilisées en télégraphie sans fil, nous ont pourtant familiarisés avec l'idée de radiations de grande longueur d'onde : les premières obtenues avaient 4 ou 5 mètres; on est arrivé à en produire maintenant de 3 millimètres. L'inter-

valle entre les plus longues radiations calorifiques et les ondes hertziennes les plus courtes s'est ainsi beaucoup réduit, et l'ont peut espérer qu'il ne tardera pas à se combler tout à fait.

2. — Il était donc assez naturel de se demander si le Soleil ne nous envoie pas des ondes de toutes les périodes possibles, et notamment des ondes électriques : une pareille hypothèse n'aurait même, d'après ce qui précède, rien que de très philosophique. Le Dr *Hermann Ebert* en a émis le premier l'idée en 1892 [1], et a tenté de l'appliquer à l'explication de la couronne solaire.

Les premiers oscillateurs de *Hertz* étaient de simples condensateurs à plateaux dont les armatures étaient reliées par un fil : la décharge donne alors naissance dans l'éther environnant à des ondes tout à fait analogues à celles de la lumière et qui se propagent avec la même vitesse. La période de celles-ci dépend de la capacité et du coefficient de self-induction du système. Mais on a reconnu depuis que la forme donnée à l'oscillateur pouvait varier considérablement, et on a réussi à faire osciller électriquement des conducteurs d'aspects très différents. Aussi M. Ebert considère-t-il le Soleil comme un oscillateur de grande dimension, où les décharges seraient excitées par de brusques perturbations de l'équilibre électrique.

Or l'expérience prouve que les gaz raréfiés deviennent lumineux non seulement sous l'action de décharges électriques ordinaires, mais aussi quand ils sont traversés par des ondes hertziennes. Partant de ce

[1] *Astr. and Astrophysics*, vol. XII, 1893, p. 804.

fait, Ebert admet que la couronne solaire est due à une illumination de cette nature, renforcée selon les endroits par les particules matérielles excessivement fines disséminées dans le voisinage du Soleil. Afin de justifier cette théorie, il a même entrepris une curieuse série d'expériences dont nous allons parler [1].

3. **Expériences d'Ebert.** — Dans un cylindre de verre, rempli d'un gaz à faible pression, est enfermée une sphère de laiton : celle-ci communique par un fil métallique avec l'appareil classique de Lecher destiné à produire les oscillations électriques : on peut donc considérer la sphère comme un centre d'émission hertzienne. On constate alors, en général, que l'espace environnant au sein du gaz raréfié devient lumineux, tandis que si l'on déforme la sphère les points de courbure irrégulière ont tendance à émettre des rayons phosphorescents.

Avec des oscillations très intenses, l'enveloppe lumineuse de la sphère conductrice s'étend relativement très loin et offre une structure radiale caractéristique : parfois même on peut observer des rayons brillants s'élançant hors de l'enveloppe. Tout cela rappelle incontestablement l'aspect de la couronne lors du maximum des taches.

Si les décharges sont plus faibles, la couche lumineuse est plus mince et les rayons s'y laissent voir moins distinctement : il en est bien ainsi aux époques de minima. Toutefois la couronne solaire présente

[1] On peut aussi consulter là-dessus Scheiner, *Populäre Astrophysik*, p. 445.

alors une extension équatoriale qui ne paraît pas avoir été reproduite par le Dr Ebert (voir fig. 42).

Quand la pression dans le cylindre de verre est un peu plus forte, on voit jaillir dans toutes les directions des rayons phosphorescents, jusqu'à des distances atteignant parfois huit fois le diamètre. Leur direction n'est pas toujours radiale, de sorte que la perspective leur donne quelquefois l'apparence d'être tangents à la sphère. Ceci se produit surtout quand le cylindre est muni d'un conducteur métallique relié à la terre, cas qui correspondrait plus ou moins à celui des poussières cosmiques en abondance dans le voisinage du Soleil.

Si l'on fixe à la surface de la sphère un petit morceau de papier d'étain, on en voit partir aussitôt un rayon lumineux entouré d'une gaine obscure, phénomène que la couronne solaire présente souvent. Lorsque dans le voisinage de la boule de laiton on place une autre masse conductrice, par exemple une autre sphère de métal suspendue à un fil de soie, la lueur change d'aspect : des rayons quittent normalement la première boule et viennent s'incurver dans le voisinage de la seconde qu'ils tendent à frapper de même normalement Disons enfin que si le gaz enfermé dans le tube est de l'air, les rayons sont colorés en rose pâle; si c'est de l'hydrogène, ils sont blanc d'argent mat : dans ce cas, leur spectre est continu. Il y a là un fait curieux qui permettrait, dans l'opinion d'Ebert, d'expliquer le spectre continu de la couronne d'une manière inattendue : on n'aurait plus besoin de faire appel à l'incandescence de particules solides ou liquides. Toutes ces expériences ne sont sans doute pas également faciles

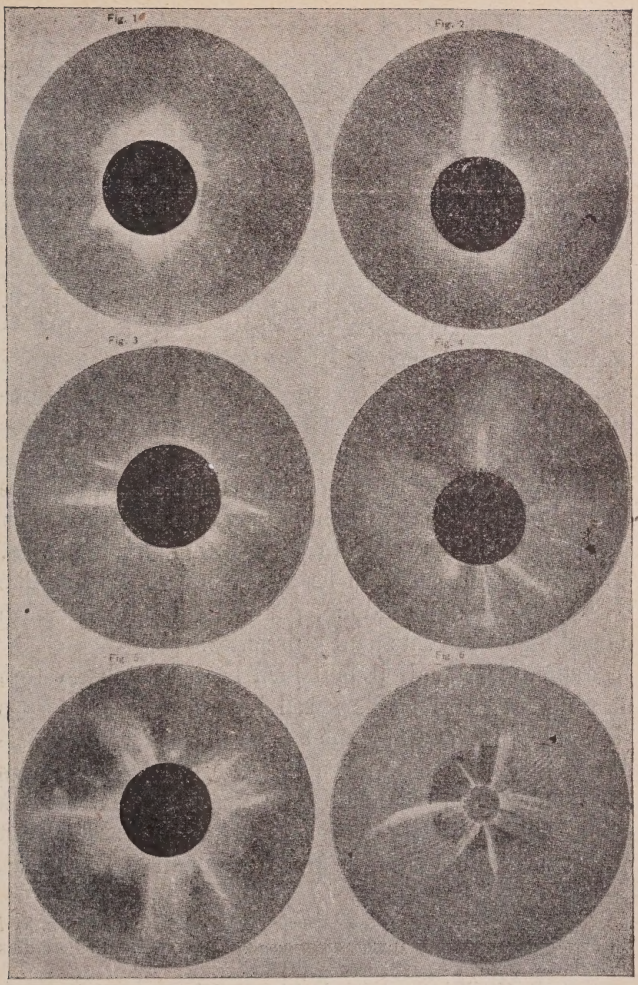


Fig. 42. — Décharges électriques dans un tube raréfié reproduisant les apparences de la couronne. (Expériences de Pupin.)

à interpréter : elles n'en sont pas moins, à tous égards, fort remarquables [1].

4. **Travaux de M. Nordmann.** — La théorie électromagnétique d'Ebert a été reprise quelques années plus tard par M. *Nordmann* [2], qui s'est efforcé d'y trouver une explication satisfaisante, non seulement de la couronne solaire, mais aussi des phénomènes dont nous nous sommes occupés au début de ce chapitre.

Bien des raisons militent en faveur de la réalité de décharges électriques dans le Soleil : nous en avons énuméré quelques-unes à propos de la théorie cathodique; mais, au point de vue plus spécial de l'hypothèse actuelle, nous ajouterons que les orages terrestres produisent constamment des ondes hertziennes : les postes en exploitation de télégraphie sans fil en « entendent » même souvent dans leurs récepteurs téléphoniques. L'atmosphère solaire, où les déplacements de matière sont si violents, doit donc, par analogie, être le siège d'oscillations extrêmement puissantes.

Malheureusement, il faut bien le dire, l'observation ne nous a rien révélé de pareil jusqu'ici, — du moins rien qui puisse être attribué au Soleil avec certitude. — *Wilsing et Scheiner* [3] ont cherché à déceler les ondes hertziennes solaires à l'aide d'un dispositif semblable à celui utilisé en télégraphie sans fil, et les résultats ont été entièrement négatifs. M. Nordmann a repris ces

[1] Nous représentons ici les expériences de M. Pupin (*Astr. and Astrophysics*, vol. XI, 1892, p. 483), tout à fait analogues à celles d'Ebert.

[2] *Annales de l'Observatoire de Nice*, t. IX, 1905, et *Thèse de doctorat*, Paris, 1903.

[3] *Wiedemanns Annalen*, Bd LIX, 1896, p. 782.

expériences aux Grands-Mulets, sur la route du Mont-Blanc (à 3o5o mètres d'altitude), et, comme la précédente, ses tentatives n'ont pas réussi. Cependant il est fort possible qu'il y ait absorption dans l'atmosphère terrestre : aussi ne peut-on pas encore dire, malgré ces essais peu encourageants, que le problème ait reçu une solution catégorique, et la thèse de M. Nordmann n'en mérite pas moins d'être exposée : dans la découverte de faits nouveaux, la théorie précède souvent l'observation.

5. **La couronne**. — M. Nordmann s'occupe d'abord de la couronne solaire dans laquelle il distingue deux choses : 1° les particules incandescentes qui donnent naissance aux banderoles ou aux jets lumineux des éclipses; 2° les gaz coronaux. Les particules, solides ou liquides, repoussées du Soleil par la pression Maxwell-Bartoli, comme le veut M. Arrhenius[1], sont maintenues à l'état d'incandescence par le rayonnement calorifique de l'astre. Un raisonnement simple fondé sur la loi de *Stefan* permet, en effet, de se rendre compte que la température, à une distance du disque égale à 5 diamètres solaires, doit dépasser 2000°. Il n'est donc pas besoin de faire appel à la phosphorescence cathodique, comme M. *Deslandres*, ou à l'influence du frottement, comme *Lockyer*, pour justifier le spectre continu observé. Mais il faut avouer que la forte polarisation de la lumière coronale (voir p. 299) n'est pas expliquée.

Quant à la forme de la couronne, elle s'explique sans peine par la théorie de *Roche*[2] sur les atmos-

[1] Voir plus loin, p. 304.
[2] Résal, *Mécanique céleste*.

phères des corps célestes en rotation : il suffit d'admettre que la gravité des particules contrebalance à peu près la répulsion due au rayonnement. Cette

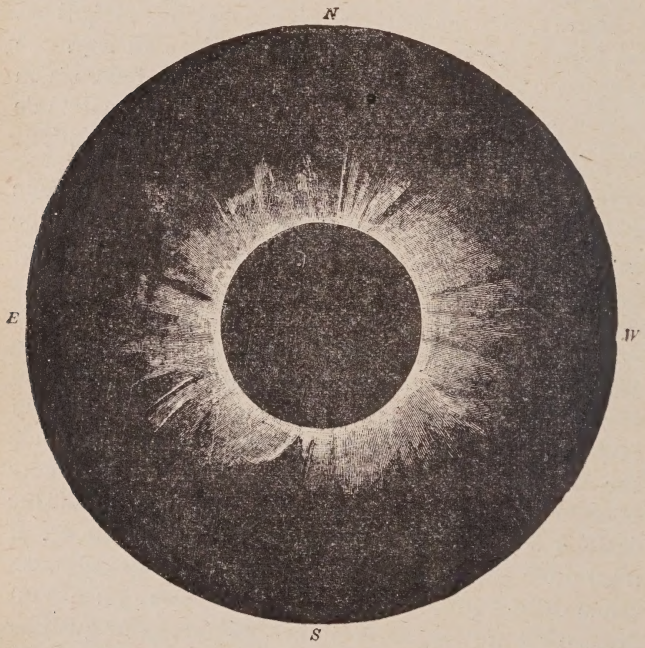


Fig. 43. — La couronne au maximum des taches.

hypothèse étant fort vraisemblable, il s'ensuit que, d'après le mémoire cité, la couronne doit affecter la structure qu'on lui voit aux époques de minimum. La forme irrégulière des années de maximum provient uniquement de l'agitation plus grande éprouvée par l'astre

entier, agitation qui masque l'effet des forces en équilibre.

6. — Jusqu'ici nous restons dans des généralités ; nous allons voir entrer en jeu la théorie électromagnétique à propos de l'incandescence des gaz coronaux : ce sont les ondes hertziennes émises par la chromosphère qui donnent naissance au spectre de lignes brillantes. M. Nordmann pense en effet que les particules solides ou liquides constituant les filaments (ou les banderoles) sont en suspens dans une véritable atmosphère de gaz solaires formés principalement de coronium. Les décharges hertziennes ont, nous l'avons vu, la propriété d'illuminer les gaz où elles se produisent : il est donc naturel que ceux-ci donnent lieu à un spectre d'émission. De plus, une hypothèse simple suffit à rendre compte de l'étendue et de l'éclat plus grand de ce spectre aux époques de maximum : il n'y a qu'à admettre que l'activité solaire est plus grande quand les taches sont nombreuses ; le rayonnement hertzien, plus intense à ces époques, nous permet alors de reconnaître les raies coronales à de plus grandes distances du bord solaire.

7. — Cette explication de la nature de la couronne est, on le voit, en contradiction avec la théorie de *Sir William Huggins*[1], adoptée par beaucoup d'astronomes. Huggins avait fait observer que si le Soleil avait réellement autour de lui l'atmosphère énorme que l'on croit constater, les couches inférieures seraient fortement comprimées. On se rappelle que *Brester* avait également

[1] *Proceedings Roy. Soc.*, vol. XXXIX, 1885, p. 108.

pressenti cette difficulté. Aussi avait-il fallu imaginer des particules incandescentes entourées chacune d'une petite atmosphère : par suite de la pression Maxwell-Bartoli s'exerçant sur les poussières, il n'y a plus compression excessive, bien que la nature du spectre reste la même. Malheureusement les phases des deux phénomènes : étendue du spectre gazeux et longueur des banderoles, sont inverses, et M. Nordmann préfère repousser l'hypothèse d'Huggins pour s'en tenir à l'idée primitive. La théorie cinétique des gaz, en attribuant aux molécules des gaz légers des vitesses colossales, permet, selon lui, d'expliquer le peu d'influence de la gravité solaire[1], et il semble bien que cette idée, émise assez récemment par *Johnstone Stoney,* mérite d'être retenue : on éviterait ainsi une grave difficulté.

8. — Disons cependant en passant qu'il y a peut-être mieux : les recherches de *Wiedmann et Schmidt*[2] ont attiré l'attention sur les spectres de fluorescence des vapeurs métalliques : ceux-ci renferment des bandes continues *et aussi des raies :* il est donc fort possible que la lumière coronale ait cette origine. La raie du coronium, au lieu d'appartenir à un corps nouveau, serait une raie de fluorescence d'un corps déjà connu, excitée par la lumière solaire; l'intervention permanente d'ondes hertziennes serait alors superflue.

[1] Si la vitesse moléculaire est voisine de la vitesse critique, le gaz ne peut être retenu à la surface et se dissipe dans l'espace. On conçoit le bouleversement apporté par ces principes à la statique des gaz. Voir là-dessus J. Stoney, *Astroph. Journal,* t. VII, 1898, p. 24-55, et Rogovsky, *Astroph. Journal,* t. XIV, 1901, p. 234-260.

[2] *Astroph. Journal,* t. III, 1896, p. 207.

On sait que la lumière de la couronne est fortement polarisée, et M. *Salet*[1] a nettement montré en 1905 qu'il en est ainsi même au voisinage immédiat du bord de la lune, là où l'absence des raies noires de Fraunhoffer exclut l'idée d'une réflexion notable de la lumière solaire. La théorie de Wiedemann et Schmidt s'accorde admirablement avec cette remarque : les expériences récentes de *Wood*[2] ont en effet prouvé que la lumière fluorescente des vapeurs métalliques est, elle aussi, polarisée, et cela sensiblement dans la même proportion que celle de la couronne.

9. **Phénomènes magnétiques.** — M. Nordmann applique aussi sa théorie aux variations du magnétisme terrestre : l'explication qui lui paraît la plus sérieuse est celle de M. *Schuster*. Il en discute cependant certains détails; mais l'interprétation qu'il propose à la place semble s'en rapprocher singulièrement. Les ondes hertziennes émanées du Soleil doivent, d'après lui, rendre conductrices les couches supérieures de l'atmosphère terrestre et leur permettre de laisser circuler les courants dus à l'induction par le champ magnétique du globe. On sait en effet que, toutes les fois qu'un gaz raréfié est parcouru par une décharge électrique auxiliaire, — une décharge hertzienne notamment, — toutes les fois aussi qu'il est illuminé électriquement, ce gaz devient apte à conduire des courants de force électromotrice extrêmement faible. Dans le cas de la haute

[1] *C. R.*, t. CXLI, 1905, pp. 528, 994. Voir aussi du même auteur, et sur toute cette question, un excellent article du *Bulletin de la Société astronomique de France*, juin 1909, p. 287

[2] *Astroph. Journal*, t. XXVIII, 1908, p. 75.

atmosphère, l'intensité des courants produits doit varier comme l'insolation et redevenir insignifiante quand le Soleil est couché.

10. — Pour ce qui est des perturbations brusques des éléments magnétiques, M. Nordmann fait ressortir par des exemples qu'elles semblent plutôt dues aux mouvements intérieurs constatés dans les taches qu'aux taches elles-mêmes. C'est ainsi qu'en dehors de l'observation célèbre de *Carrington* et *Hodgson* et de celle de *Young*[1], *Trouvelot* a pu constater, le 17 juin 1891, un phénomène analogue à ceux-là et coïncidant avec une perturbation magnétique nettement accusée. A 1 minute près, c'est-à-dire dans les limites possibles des erreurs d'observation, l'éruption lumineuse s'est produite dans la tache au même moment que la perturbation magnétique enregistrée en divers endroits, notamment à Greenwich et à Nice. On peut donc en conclure, avec une certaine vraisemblance, que les orages magnétiques nous arrivent du Soleil avec la vitesse de la lumière, ce qui serait d'un certain poids en faveur d'une action hertzienne : les oscillations électriques se propagent, en effet, avec cette vitesse.

Cette constatation, — à supposer qu'elle soit définitivement établie, — porterait un coup fatal à la théorie cathodique et à celle d'*Arrhénius*, car la vitesse des particules ionisées que toutes deux introduisent ne saurait atteindre celle de la lumière. D'autre part, l'idée d'une action directe du Soleil a été à peu près écartée, dans l'opinion de Nordmann, par l'objection de lord Kelvin.

[1] *Le Soleil*, par C. A. Young, trad. française, p. 124.

La thèse hertzienne vient alors suggérer une solution : les ondes solaires nées des brusques mouvements de la chromosphère peuvent, en favorisant l'action des courants atmosphériques, causer soudainement les effets observés, sans qu'on ait besoin de demander au Soleil une dépense d'énergie disproportionnée.

11. — Les périodes des aurores boréales sont également susceptibles de recevoir une explication fondée sur les mêmes principes. Les deux théories les meilleures de ce phénomène sont celle de M. *Arrhénius*[1] et celle de M. *Birkeland*[2]. Nous dirons bientôt quelques mots de la première. M. Nordmann l'écarte en s'appuyant sur des recherches statistiques entreprises par lui, et qui établiraient un rapport entre les taches solaires et les températures moyennes de la Terre. Les années de maximum, la température aurait tendance à baisser : il se peut qu'il en soit ainsi, cela paraît même probable ; malheureusement on ne saurait prétendre que les résultats de cette enquête soient définitifs. Aussi n'insisterons-nous pas sur ce point.

12. — **Expériences de Birkeland.** — Quant à la théorie des plus remarquables de M. Birkeland, elle repose sur la succion[3] des rayons cathodiques et aussi sur une expérience postérieure fort suggestive. Un électro-aimant sphérique est placé dans un tube de Crookes et exposé à un faisceau cathodique à peu près parallèle. Si l'électro-aimant est en activité, on

[1] *Revue générale des sciences*, 1902, p. 65.

[2] *Videnskabsselskabets Skrifter*, t. I; *Mathematisk-naturwidenskabelig Klasse*, 1901, n° 1.

[3] Voir plus haut, p. 280.

remarque, en dehors de la succion connue par les deux pôles, un ou plusieurs anneaux lumineux bien définis dans le gaz voisin de la surface. De plus, si l'on enduit l'électro-aimant de platino-cyanure de baryum, ce sel devient parfois phosphorescent au-dessous de l'anneau, montrant ainsi que ce dernier est lui-même une source de rayons cathodiques. M. Birkeland en déduit que l'anneau est constitué par un véritable courant de corpuscules cathodiques. On voit immédiatement l'assimilation aux aurores boréales : la terre représentant l'aimant sphérique, le Soleil la source primaire de rayons cathodiques, et l'aurore elle-même l'anneau secondaire. M. Nordmann objecte que si l'anneau est un courant électrique régulier, une perturbation magnétique doit se produire partout à chaque aurore boréale ; or s'il en est bien généralement ainsi dans la zone tempérée, les deux ordres de faits semblent ne plus avoir aucun rapport dans les régions arctiques.

Il y a plus : M. Nordmann relève une contradiction entre la théorie aurorale de Birkeland et une autre idée toute différente[1] proposée antérieurement par le même savant. A la suite d'une vaste étude statistique, M. *Birkeland* pense avoir établi que les taches solaires ont une préférence marquée pour certaines régions de l'astre[2]. La constatation d'un tel fait exige, bien entendu, l'intervention de facteurs connus avec peu de précision, tels que la période synodique de la rotation solaire. Si

[1] *Rapports du Congrès de physique de 1900*, p. 471-479.

[2] Non seulement en latitude, mais en longitude. Il en serait ainsi dans le cas d'un noyau solide intérieur d'où proviendraient les taches : ce seraient alors des sortes de volcans. *Spörer* était déjà favorable à cette idée, bien qu'il n'ait pu l'établir nettement.

nous l'admettions cependant, le fait que les taches émettraient plus fortement les rayons cathodiques excitateurs causerait dans les aurores boréales une périodicité égale à la rotation du Soleil. Or on n'a rien constaté de pareil. Les choses se passeraient tout autrement si les taches, au lieu d'émettre des rayons cathodiques dirigés, nous envoyaient des ondes hertziennes se propageant de tous côtés.

13. — Ces arguments, joints à d'autres plus spéciaux, pour le détail desquels nous renverrons au mémoire original, ont conduit M. Nordmann à rejeter la théorie de Birkeland pour attribuer les aurores à une illumination hertzienne excitée par le Soleil dans l'atmosphère supérieure, conformément aux expériences d'*Ebert* et *Wiedemann*. La luminescence ainsi engendrée ne doit, dans ce cas, être accompagnée d'aucune perturbation magnétique spéciale. Ce n'est que si l'induction terrestre, combinée avec les mouvements de l'atmosphère, y produit des courants électriques que les rayons hertziens solaires, en augmentant la conductibilité, permettent de constater des perturbations; aussi les aurores animées de déplacements rapides troublent-elles surtout l'aiguille aimantée : il n'y a là en réalité, selon M. Nordmann, que deux phénomènes indépendants entre eux, mais dus à une même cause.

14. — L'idée d'une émission hertzienne, dont M. Nordmann s'est fait dans ces derniers temps le champion zélé et ingénieux, peut fort bien, à part quelques objections de détail, contenir une grande part de vérité. Toute la question est de savoir si, en fait, les ondes invoquées sont bien émises par le Soleil en

quantité suffisante pour avoir les effets qu'on veut leur attribuer, et surtout si elles ne sont pas absorbées en route dans la haute atmosphère solaire. Sur ce point, il faut bien l'avouer, l'expérience s'est jusqu'ici montrée muette, et si l'on reste en droit de dire qu'un résultat entièrement négatif ne saurait demeurer acquis, on peut encore bien moins en tirer une conclusion favorable.

THÉORIE D'ARRHÉNIUS

1. **La pression de radiation.** — De toutes les conséquences de la théorie électromagnétique de la lumière, une des plus remarquables est celle-ci : qu'un corps frappé par un faisceau de rayons lumineux doit éprouver par ce fait seul, dans leur direction, une pression normale à sa surface. La démonstration théorique de cette loi établie d'abord par *Maxwell*[1] et ensuite par *Bartoli* devait précéder de beaucoup la vérification expérimentale, qui n'a pu être effectuée que tout dernièrement. Des expériences effectuées indépendamment par *Lebedeff* en Russie, puis par *Nichols* et *Hull*[2] en Amérique, à l'aide de radiomètres[3] extrêmement sensibles et particulièrement protégés contre toute action étrangère, ont révélé l'existence d'une

[1] Maxwell, *Traité d'électricité,* trad. Seligmann-Lui, p. 495, t. II ; Bartoli, *Nuovo Cimento,* (3), t. XV, p. 193, 1884.

[2] Lebedeff, *Congrès de 1900,* t. II, p. 133. — Nichols et Hull, *Astroph. Journal,* t. XVII, p. 315, 1903, et t. XVIII, p. 352, 1903.

[3] Les mouvements du radiomètre à ailettes de *Crookes* s'expliquent par la théorie cinétique des gaz. D'ailleurs la pression de radiation fait tourner les ailettes en *sens inverse.*

pression qui s'est trouvée à peu de chose près égale à la valeur calculée par la théorie.

2. — Une nouvelle force entrait en jeu, et il était naturel de prévoir ses effets dans un univers peuplé d'astres puissamment lumineux : telle est l'idée directrice d'*Arrhénius*[1], idée que son auteur, en même temps que d'autres savants, a complétée et étendue dans de nombreux mémoires.

Nous avons vu que les queues des comètes indiquaient l'action d'une force répulsive opposée au Soleil ; la force n'est pas, selon Arrhénius, de nature électrique à proprement parler : c'est précisément la pression Maxwell-Bartoli[1].

D'après la théorie, cette pression est proportionnelle à la surface du corps frappé et égale en grandeur à la densité de l'énergie rayonnante (c'est-à-dire à la quantité d'énergie par unité de volume) au point considéré ; ainsi, par exemple, si nous admettons pour valeur de la constante solaire 3 calories-grammes par minute (nombre de Langley), il est facile d'en déduire[2] que chaque mètre carré d'une surface noire absorbante subit, à la distance de la terre, une pression de $\frac{2}{3}$ de dyne, c'est-à-dire vulgairement à peu près $\frac{2}{3}$ de milligramme.

[1] S. Arrhénius, Sur la cause de l'aurore boréale, *Annales de Drude*, 1901, et *Revue générale des sciences*, janv. 1902.

[2] Le calcul est fait un peu plus loin pour un point voisin de la surface solaire.

3. — Comme la pression Maxwell-Bartoli varie en raison directe de la surface des corps et la gravitation solaire en raison directe de leur volume, on se rend compte que si l'attraction l'emporte toujours sur la répulsion pour les corps de grandes dimensions, il n'en est pas de même pour les plus petits. La densité de l'énergie est en effet, comme l'attraction newtonienne, inversement proportionnelle au carré de la distance au Soleil; on a donc pour une petite sphère du rayon a, si p est la pression lumineuse, G la gravitation solaire :

$$\frac{p}{G} = \alpha \frac{\pi a^2}{\frac{4}{3}\pi a^3} = \frac{3}{4a}\alpha$$

(α étant un rapport constant).

Plus la sphère est petite, plus la pression est forte comparée à l'attraction.

4. — A la surface du Soleil, le rayonnement est $(215{,}7)^2$ fois plus grand qu'à la surface de la terre; admettons avec Arrhénius une constante solaire de 2,5, soit $1{,}74 \times 10^6$ ergs par seconde; cette constante sera, sur le Soleil : $1{,}74 \times 10^6 \times (215{,}7)^2$ ergs. Comme l'énergie rayonnante parcourt en 1 seconde 300 000 kilomètres, la quantité d'énergie ci-dessus se trouve répartie dans un cylindre de 1 centimètre de base ayant une longueur de 3×10^{10} centimètres; la pression Maxwell-Bartoli est donc, à la surface du Soleil, égale à :

$$\frac{1{,}74 \times (215{,}7)^2 \times 10^6}{3.10^{10}} = 2{,}70 \text{ dyne par centimètre carré.}$$

Or le poids d'un corps est, sur le Soleil, 27,47 fois plus grand que sur la terre : 1 centimètre cube d'eau,

au lieu de peser 981 dynes, en pèse $981 \times 27{,}47$, soit 27000 environ, c'est-à-dire que l'attraction newtonienne est 10^4 fois plus forte que la pression de radiation. Il en résulte que, pour un cube d'arête égale à 10^{-4}, de densité unité, le poids solaire proportionnel à la masse sera, avec la pression Maxwell-Bartoli proportionnelle à la surface, dans le rapport de

$$\frac{10^{-12}}{18^{-8}} \times 10^4 = 1 ;$$

les deux forces seront donc du même ordre et la répulsion pourra dépasser, chez les corps un peu plus petits, l'attraction. Les calculs précédents supposent qu'il y a absorption de l'énergie incidente par la surface frappée; dans le cas où il y a réflexion, la théorie montre que la valeur de la pression doit être doublée.

5. — Le diamètre critique d'une particule liquide ou solide de l'atmosphère solaire, diamètre au-dessous duquel la matière n'est plus attirée, mais repoussée par l'astre rayonnant, est à peu près de $1^{\mu},5$, la densité étant prise égale à l'unité. Nos raisonnements ne sont d'ailleurs valables que pour les corps en repos. D'autres complications peuvent s'introduire dans les calculs quand les gouttelettes sont en mouvement rapide ou quand leurs dimensions sont inférieures aux longueurs d'onde de la lumière; dans ce dernier cas apparaissent des phénomènes de diffraction qui ont été étudiés en détail par M. *Schwartzschild*[1]. Ce savant a montré que le rapport de la pression de l'énergie rayonnante à l'attraction newtonienne ne croît pas indéfiniment avec

[1] *Münchener Berichte*, t. XXXI, 1901, p. 293.

le diamètre du corps frappé, mais a un maximum pour une valeur du diamètre à peu près égal à $\frac{\lambda}{3}$ (λ étant la longueur d'onde de la radiation incidente). Quand les dimensions des gouttelettes diminuent davantage, le rapport s'abaisse rapidement. Les restrictions de M. Schwartzschild ne s'opposent pas à la validité des raisonnements d'Arrhénius; mais elles montrent que la question doit être étudiée de très près.

6. **Analogies cométaires.** — En s'appuyant sur les résultats expérimentaux et les calculs cités, M. Arrhénius pense pouvoir attribuer les queues de comètes à des particules de poussières cosmiques soumises à la pression répulsive de la radiation. La couronne solaire, dont les formes paraissent si souvent rappeler celles des queues des comètes, pourrait également être interprétée d'une manière analogue. Arrhénius s'occupe donc d'abord, tout naturellement, de calculer les dimensions possibles des poussières cométaires. On sait que l'astronome russe *Bredikhine* a établi[1] que les queues des comètes pouvaient, en général, se ramener à trois types selon leur courbure : la force répulsive peut atteindre, la gravitation étant prise pour unité, 18,5 pour la première catégorie, 3,2 pour la seconde et 2 ou 1,5 fois pour la troisième. A ces chiffres[2] cor-

[1] *Annales de l'Observatoire de Moscou,* t. III, 1re partie, 1877, p. 37; t. V, 2e partie, 1879, p. 137, et t. VI, 1re partie, p. 60.

[2] Nous reproduisons les chiffres dont parle Arrhénius. Il faut dire en effet que les nombres de Bredikhine ont un peu varié, comme ses classifications. Ainsi Scheiner (*Pop. Astroph.,* p. 543) donne : 1re catégorie, 18; 2e, de 2,5 à 0,5 (1,1 en moyenne); 3e, de 0,3 à 0,1.

respondent pour les particules des diamètres de $0^{\mu},1$, $0^{\mu},59$, $0^{\mu},94$ et $1^{\mu},25$. Quelques queues de comètes sont tournées vers le Soleil ; la répulsion n'est alors que le 1/3 du poids, et le diamètre des particules est alors égal à 6^{μ}. Il est certain que les poussières seraient dans tous ces cas-là fort petites ; mais ces chiffres n'ont rien qui doive nous étonner. Il existe certainement des corpuscules matériels aussi petits : certains microbes ont moins de $0^{\mu},3$, et on a pu préparer des pellicules liquides de $0^{\mu},005$.

7. — A la vérité il a souvent paru plus simple, autrefois surtout, d'attribuer la force répulsive du Soleil à une cause électrique directe. C'est ainsi, par exemple, que *Zöllner* l'expliquait dans des travaux qui rendent fort bien compte en général des phénomènes observés. Mais il n'y a aucune preuve qu'une telle action électrique existe réellement, et tant que l'on n'en aura pas on pourra toujours objecter qu'il n'est guère scientifique d'expliquer un phénomène unique à l'aide d'une hypothèse particulière. Il n'en est pas de même pour la pression Maxwell-Bartoli, conséquence directe de l'émission lumineuse du Soleil et suite nécessaire de la théorie électromagnétique de la lumière, laquelle est universellement admise aujourd'hui. D'ailleurs l'expérience a prouvé, on l'a vu, l'existence objective de cette pression. Nous devons cependant reconnaître que les théories d'Arrhénius, pas plus que celle de Zöllner, n'évitent entièrement les hypothèses ; ce serait impossible, vu l'état de la question.

8. **Les idées d'Arrhénius.** — Tels sont les principes généraux; entrons maintenant dans quelques détails. On peut admettre que les puissantes éruptions provoquées par les protubérances détachent du Soleil des portions de matière, lesquelles vont se condenser sous forme de gouttelettes ou de corpuscules[1]. Ce sont ces petits corps qui, repoussés par les rayons solaires, donnent lieu, au-dessus des endroits d'éruptions, aux filaments de la couronne; ces derniers prennent naissance en général dans la région des taches. On comprend qu'ils ne paraissent pas déviés, puisque leur vitesse pour une particule du rayon critique soumise à l'influence du rayonnement, depuis la surface jusqu'à une distance égale au diamètre solaire, atteint 430 kilomètres par seconde : notre particule mettrait, à cette vitesse, moins d'une heure à faire le trajet. Quant aux rayons coronaux non radiaux, Arrhénius les explique, sans chercher plus loin, par des forces éruptives comme le voulait *Schaeberle*.

[1] M. *Schaeberle* a cru pouvoir expliquer la couronne de cette façon par des éruptions de la photosphère. Malheureusement des éruptions dans les nuages photosphériques seraient peu vraisemblables, il faudrait les imaginer dans le noyau solaire sous-jacent. De plus, celles-ci, comme Newcomb l'a montré (*Popular Astronomy*, p. 260), devraient avoir, à plus de 15′ d'arc de la surface, des vitesses de 350 kilomètres par seconde; or de pareilles vitesses, quand par hasard elles se rencontrent dans les protubérances, sont essentiellement fugitives (Deslandres, *Annales du Bureau des Longitudes*, t. V, 1907, p. C. 61). Ces raisons font qu'il est à peu près indispensable d'introduire la pression Maxwell-Bartoli. Voir sur ce sujet : Schaeberle, *Astr. and Astrophysics*, 1893, p. 7, 730, 765 et A. de la Baume-Pluvinel, *C. R.*, t. CXVII, 1893, p. 26-29.

9. — La majeure partie des particules retombe sur le Soleil en suivant des trajectoires très incurvées : les plus grosses par l'effet de leur propre poids, les plus petites après s'être agglomérées peu à peu les unes aux autres ; mais il y a cependant des particules qui poursuivent leur route. Les trajectoires de retour des petites particules[1] sont sensiblement dirigées vers le centre du Soleil ; un observateur situé sur le côté non éclairé de la terre, qui perçoit l'impression de la lumière réfléchie par elles, doit donc voir le maximum de lumière en un point directement opposé au Soleil[2]. C'est précisément ce que l'on observe dans les pays du midi sous le nom de « gegenschein ».

10. — Jusqu'ici nous ne nous sommes pas occupés des phénomènes électriques. La radiation ultra-violette du Soleil, déjà intense après avoir traversé notre atmosphère qui l'absorbe fortement, doit être très considérable à la surface même de l'astre ; les gaz de l'atmosphère solaire doivent donc être, de ce chef, fortement ionisés. D'ailleurs, dans les mouvements extrêmement puissants de l'atmosphère solaire, il est fort probable

[1] La concentration des particules de l'espace interplanétaire, au lieu d'être proportionnelle à $\frac{1}{r^2}$, comme dans le cas où aucune particule ne retomberait, est alors proportionnelle à $\frac{1}{r^2+\alpha}$, α étant un petit nombre positif. Sans cela l'auréole coronale ne se verrait pas.

[2] Ainsi, quand on regarde tirer un obus de faible vitesse initiale, si on est derrière le canon (et aussi probablement lorsqu'on est devant), on voit le projectile. On ne le voit pas si on est placé latéralement. — L'explication qu'Arrhénius donne du « gegenschein » est en somme analogue à celle bien connue du « point radiant » des étoiles filantes.

qu'il y a séparation d'électricité positive et négative[1]; il doit donc se produire des décharges s'étendant à de grandes hauteurs dans l'atmosphère solaire, — aussi haut que les masses projetées, — et il se développe sans doute, dans ces régions où les gaz sont extrêmement raréfiés, des rayons cathodiques ; ceux-ci donnent naissance à des rayons X qui sont encore une autre cause importante d'ionisation.

Or, *C. T. R. Wilson* a établi que les ions négatifs condensaient les vapeurs plus facilement que les ions positifs ; ce sont donc surtout les premiers qui, dans l'atmosphère solaire, font office de noyaux de condensation, et les particules matérielles chassées par la pression Maxwell-Bartoli sont donc, de préférence, négativement chargées. Les environs du Soleil resteront alors entourés d'une atmosphère chargée d'électricité positive : la couronne. Quant aux particules négatives, elles se répandront, comme nous l'avons dit, à travers les espaces cosmiques et iront charger négativement les corps célestes qu'elles rencontreront, la terre et les planètes en particulier. Ceux-ci verront le potentiel négatif superficiel de leur haute atmosphère croître jusqu'à une certaine limite, passé laquelle le rayonnement ultra-violet du Soleil exerce son action déperditrice. Une décharge de nature cathodique se produira en sens inverse et les mêmes phénomènes pourront se répéter dans le même ordre, indéfiniment, avec des alternatives de charges et de décharges qui constitueront une sorte d'équilibre mobile.

[1] *Zöllner*, et auparavant *Respighi* et *Tacchini* admettaient aussi que les éruptions solaires s'accompagnaient, comme celles de nos volcans d'ailleurs, de puissantes décharges électriques.

11. — Le côté du jour de la terre est donc inondé de particules; celles-ci restent dans les hautes couches de l'atmosphère, vers 200 kilomètres d'altitude, plus haut encore que les régions fréquentées par les étoiles filantes. Et c'est l'action du champ magnétique terrestre sur les rayons cathodiques provenant de la décharge [1] qui donne naissance aux aurores boréales. Le phénomène [2] est, au fond, identique à celui que l'on observe quand on introduit un tube de Crookes dans un champ magnétique : les trajectoires cathodiques s'enroulent autour des lignes de force.

Plus l'activité solaire est grande, plus il se forme de gouttelettes dans les couches solaires extérieures et plus le rayonnement nous envoie de particules négatives. On voit donc comment la fréquence des aurores boréales, conséquence de celle des décharges cathodiques dans la haute atmosphère, peut être liée à la périodicité de l'activité solaire. Arrhénius applique d'ailleurs sa théorie à l'explication des diverses périodes des aurores boréales; nous renverrons pour plus de détails, sur cette question qui sort un peu de notre sujet, à l'article cité de la *Revue générale des Sciences*.

[1] Cette explication ne diffère de celle de *Birkeland* que par l'interprétation des rayons cathodiques secondaires, fondée chez Birkeland sur une expérience décrite, ici sur l'action de la lumière ultra-violette.

[2] Des expériences, extrêmement intéressantes concernant d'ailleurs la physique du globe plutôt que le Soleil, ont été entreprises récemment par M. P. Villard (*Bulletin de la Société de Physique*, 1907, p. 114) : nous devons nous borner à les mentionner, car les décrire nous entraînerait trop loin.

12. — Il est à remarquer[1] que, dans le cas où la pression de radiation est double de la gravité, une particule mettrait, comme le calcul l'indique aisément, 68,7 heures pour nous arriver du Soleil. Or Arrhénius, se basant sur les travaux déjà cités de Schwartzschild, trouve que les dimensions d'une particule qui éprouverait la répulsion maxima seraient de l'ordre de $\frac{0^{\mu},5}{3}$ en diamètre, soit $0^{\mu},08$ de rayon, puisque la longueur d'onde de la radiation solaire la plus intense est environ $0^{\mu},5$. La répulsion pour une particule de densité 1 parfaitement réfléchissante se monte alors à à peu près dix fois son poids; pour une particule absorbante elle serait réduite de moitié. Comme les gouttelettes qui peuvent se former dans l'atmosphère solaire ne rentrent dans aucun de ces deux cas limites, une partie de l'énergie est transmise. Arrhénius admet que, pour un fluide translucide, la pression est deux fois et demie le poids, ce qui conduit à admettre que les particules de la grosseur indiquée mettent 46 heures à faire le trajet du Soleil à la terre. Ce calcul serait sans grand intérêt si les recherches de *Ellis*, *Maunder* et *Ricco* n'avaient indiqué que les orages magnétiques se produisent, dans de nombreux cas, 45 heures environ après le passage d'une grande tache au méridien central du Soleil[2]. Il est juste de dire que tous ces calculs

[1] *On the Electric equilibrium of the Sun* (*Monthly Notices*, vol. LXIV, 1904, Appendice, p. 50). Voir aussi, d'une manière générale, S. Arrhénius, *Lehrbuch der kosmischen Physik*. Leipzig (S. Hirzel), 1903.

[2] D'autres observations tendent, au contraire, à faire croire que la vitesse de propagation est celle de la lumière (voir théorie de Nordmann, p. 300).

d'Arrhénius contiennent une très forte part d'arbitraire.

13. **Objection de la charge positive résiduelle du Soleil.** — Une objection s'impose : celle-là même que nous avons rencontrée à propos de la théorie cathodique[1]. Si le Soleil n'émet guère que des particules négativement chargées, sa charge positive doit croître indéfiniment sans compensation et les forces électriques doivent bientôt tendre à arrêter toute émission nouvelle de particules. M. Arrhénius répond que les forces électriques attractives peuvent très bien ne pas être suffisantes pour empêcher d'agir la pression lumineuse. Si nous supposons que la plus petite quantité d'électricité négative existant à l'état libre est égale à la charge positive d'un atome d'hydrogène, soit 10^{-20} unités électro-magnétiques (et nous savons que les recherches récentes de *J. J. Thomson* et *C. T. R. Wilson* ont conduit à ce résultat admis aujourd'hui), il est facile de calculer que la force correspondant à une chute unitaire de potentiel de 3000 volts par centimètre serait $23{,}2\ 10^{-10}$ dyne[2]. Une gouttelette de rayon égal à $0^{\mu},08$, de densité égale à l'unité, a un poids de $59\ 10^{-10}$ dyne à la surface du Soleil, tandis que sa répulsion par la pression Maxwell-Bartoli est 2,5 fois plus grande, soit $148\ 10^{-10}$ dyne. L'attraction électrique est, par suite, à peu près le quart de la répulsion lumineuse; la vitesse

[1] Voir p. 288.

[2] Arrhénius part, pour arriver à ce chiffre, non pas du résultat plus récent 10^{-20}EM comme charge élémentaire, mais d'un autre un peu moindre, ce qui explique le chiffre un peu faible qu'il trouve ici.

avec laquelle la particule considérée nous parvient est donc les $\frac{3}{4}$ de celle calculée précédemment. Il est évident que si la charge électrique du Soleil, ou plutôt celle de son atmosphère extérieure, est quadruple de celle supposée, les particules de rayon $0^{\mu},08$ ne peuvent quitter le Soleil. D'autre part, si la charge du Soleil est beaucoup moindre, la vitesse des particules sera presque indépendante de leur charge électrique. Il est probable, selon Arrhénius, qu'aux époques d'émission intense, c'est-à-dire lors des maxima des taches, la charge solaire est de l'ordre de grandeur indiqué, tandis qu'elle est inférieure aux époques du minima des taches.

14. — **Conséquences cosmiques**. — On pourrait croire que les particules les plus petites, celles qui, nous l'avons vu, ne retombent pas sur le Soleil, perdent leur charge sous l'influence des rayons ultra-violets émanés du Soleil même. Cette circonstance les empêcherait alors de prendre naissance : les premières gouttes, ne contenant qu'une unité de charge élémentaire, la perdraient du premier coup. Arrhénius admet alors que les choses ne se passent pas de la même façon pour les petites particules, pour les électrons, que pour les grosses. Ces dernières, en tout cas, perdent leur charge sous forme d'électrons unitaires qui parcourent sans doute en tous sens les espaces cosmiques.

15. — Les électrons provenant de la décharge des particules par la lumière ultra-violette décrivent autour du Soleil des trajectoires plus ou moins hyperboliques et peuvent, dans certains cas, retomber eux aussi sur le Soleil. Arrhénius calcule que si l'on admet, pour la

vitesse moyenne des électrons, le $\frac{1}{30}$ de celle de la lumière, ce qui est d'accord avec les expériences faites sur les rayons cathodiques, tous les électrons de l'espace situés à moins d'1,25 année de lumière du Soleil finiront par être capturés par lui. Comme l'étoile la plus proche de nous (α du Centaure) est à une distance de 4 ans de lumière, les électrons négatifs ne peuvent guère voyager d'un Soleil à l'autre, et la plus grande partie finit par retomber sur l'astre qui l'avait émise. La charge électrique du Soleil ne peut plus donc croître sans limites. Il est d'ailleurs à remarquer que la pression de radiation, plus considérable que l'attraction newtonienne dans le voisinage du cas maximum envisagé par Schwarzschild, devient insignifiante pour les très petits corps, — les électrons, — alors que l'action électrique reste la même. C'est grâce à cela que les choses se passent différemment.

16. — Toutefois Arrhénius ne pense pas que tous les électrons négatifs émis par les étoiles restent confinés dans la sphère d'action de celles-ci : ceux qui parviennent à s'échapper jouent peut-être, selon lui, un rôle dans la théorie des nébuleuses. La matière excessivement raréfiée des nébuleuses ne paraît pas, d'après les idées actuelles, être à une température de plus de quelques degrés au-dessus du o absolu ; leur lumière n'est certainement pas due à une incandescence ordinaire qui, par la chaleur dégagée, occasionnerait une diffusion générale des gaz nébulaires dans tout l'espace : elle est donc plutôt causée par quelque phénomène électrique. La basse température d'un gaz favorise d'ailleurs,

d'après les recherches de *J. Stark*, sa luminescence électrique. Il est alors naturel de penser que des décharges cathodiques, produites par les électrons errants auxquels nous avons fait allusion, pourraient causer de tels effets : cela permettrait d'expliquer l'apparence de la plupart des nébuleuses planétaires, qui sont plus brillantes à la périphérie qu'au centre, contrairement à ce qui aurait lieu dans le cas d'une matière lumineuse uniformément distribuée. Il semble cependant qu'avec cette explication de la lumière des nébuleuses, l'atmosphère terrestre doit elle aussi nous paraître illuminée pendant la nuit [1], et on ne voit pas trop comment Arrhénius peut tourner l'objection.

LES TRAVAUX DE HALE SUR LES CHAMPS MAGNÉTIQUES DES TACHES SOLAIRES

1. — Nous ne pouvons enfin passer sous silence les recherches expérimentales de M. *Hale* [2], qui constituent sans nul doute la preuve la plus directe que nous ayons de l'existence dans le Soleil de phénomènes électromagnétiques. A vrai dire, ces études n'en sont encore qu'à leurs débuts ; elles se bornent à un seul ordre d'idées, et on n'a guère essayé encore d'en tirer des conclusions générales qui seraient prématurées ; mais comme elles présentent sous un jour tout nouveau les problèmes posés, nous allons les résumer en peu de mots.

[1] Deslandres, *C. R.*, 134, 1902, p. 1486.

[2] *Nature*, 20 août 1908, p. 368. — Voir aussi *Astroph. Journal*, nov. 1908, p. 315.

2. — **Idée de la possibilité d'un effet Zeeman dans les taches.** — Nous savons que les clichés

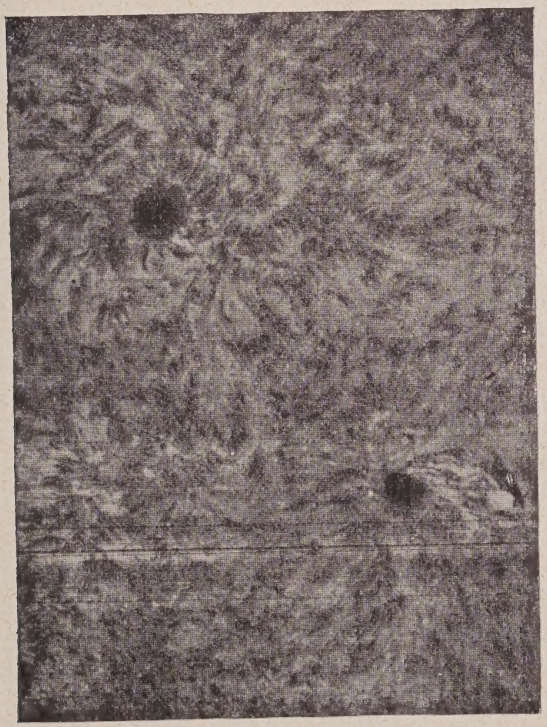


Fig. 44. — Mouvements tourbillonnaires dans deux taches obtenus avec la raie C, d'après Hale.

spectrohéliographiques ordinaires obtenus soit par M. Hale avec la raie H_2, soit par M. Deslandres avec

les raies K_2 du calcium ne révèlent, en général, chez les taches aucune trace bien nette de rotation, pas plus que chez les facules et les flocculi environnants. Il n'en est pas toujours de même des épreuves analogues relatives à l'hydrogène : la couche absorbante correspondante peut être plus élevée que celle des vapeurs de calcium, et les résultats n'ont aucune raison d'être identiques [1]. C'est ainsi qu'à de nombreuses reprises M. Hale, opérant avec la raie C, isolée tout entière, a pu reconnaître des taches entourées de tourbillons assez nets (fig. 44). A la fin de mai 1908 notamment, une tache de cette catégorie apparut qui laissa voir un grand flocculus s'engouffrant vers son centre, flocculus dont la vitesse put être estimée, en comparant des plaques prises à intervalles très rapprochés, à 100 kilomètres par seconde environ. D'autres épreuves confirmèrent ces résultats (fig. 45), et l'on commença à se demander, la réalité de tourbillons matériels une fois admise, s'ils n'auraient pas pour nous quelques conséquences intéressantes.

3. — Nous avons de sérieux motifs de supposer la matière solaire chargée d'électricité. Il est notamment bien connu que les corps chauds émettent des électrons négatifs [2] ; le carbone et tous les métaux, quel que soit leur état physique, fussent-ils à l'état de vapeur, partagent cette propriété. Nous avons donc là une nouvelle

[1] Pour plus de détails sur cette question des couches de l'atmosphère solaire, voir plus loin, p. 327.

[2] C'est ce que l'on nomme, dans les lampes électriques, l'effet Edison. Voir pour ce phénomène : *Ions, Électrons, Corpuscules*, Paris, Gauthier-Villars, et, dans le même recueil, les travaux de *Richardson*, continués d'ailleurs depuis.

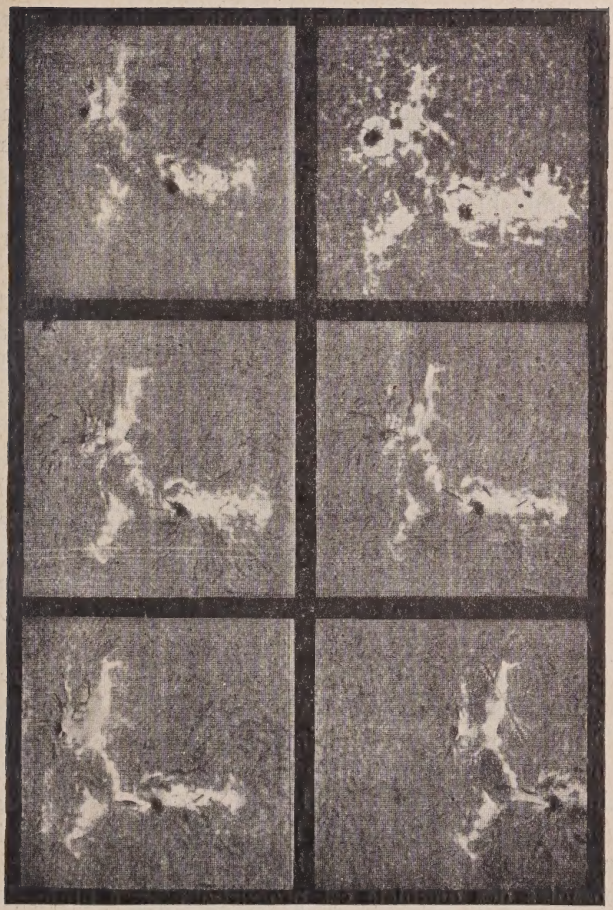


Fig. 45. — Exemple de mouvements rapides dans une tache les 10 et 11 sept. 1908. D'après Ph. Fox et C. Abetti.

raison très forte s'ajoutant à toutes celles que nous avons déjà de penser que le Soleil, où se rencontrent les mêmes corps que sur la terre, doit émettre un grand nombre de corpuscules : et si un filament de carbone à son maximum d'incandescence peut produire un courant de plusieurs ampères par centimètre carré, il est vraisemblable que dans le Soleil, considérablement plus chaud, l'émission corpusculaire doit être encore bien plus intense.

Or nous venons de voir que cette matière solaire, vraisemblablement chargée d'électricité, se mouvait parfois en vastes tourbillons : l'expérience célèbre de Rowland est alors là pour nous prouver que l'effet d'un pareil déplacement d'électricité est analogue à celui d'un courant circulaire continu, c'est-à-dire qu'un champ magnétique parallèle à l'axe du tourbillon prend aussitôt naissance : le champ est proportionnel à la vitesse du tourbillon, et si celle-ci est très grande, il pourra sans doute devenir appréciable grâce à l'effet Zeeman.

4. — On sait en quoï consiste ce phénomène, sans lequel nous ne pourrions guère, à la distance où nous sommes du Soleil, reconnaître de pareils champs. Si l'on place une source lumineuse dans un champ magnétique, par exemple entre les pôles d'un gros électro-aimant, et si l'on observe le spectre de la source dans une direction parallèle aux lignes de force, chaque raie se dédouble (fig. 46). La distance entre les deux composantes des doublets est proportionnelle à l'intensité du champ et au carré de la longueur d'onde ; de plus, les lumières de ces deux composantes sont polarisées circulairement en sens inverse. Si d'ailleurs l'observa-

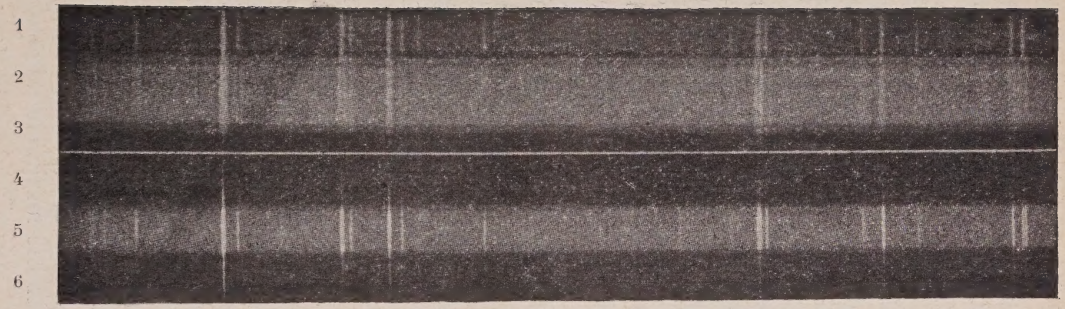


Fig. 46. — Effet Zeeman transversal photographié au laboratoire et montrant les élargissements ou dédoublements des raies de fer (spectres 2 et 5).

tion se fait dans une direction perpendiculaire aux lignes de force, le phénomène est un peu différent, quoique de même nature.

5. — On voit donc que, si nous regardons une tache située du centre du disque formant, par exemple, un tourbillon d'axe dirigé vers notre œil, nous devons voir les raies spectrales se dédoubler de la façon indiquée. Or depuis longtemps on avait remarqué des dédoublements de raies sombres dans les taches, mais on les prenait pour des renversements : les deux phénomènes ont, en effet, dans le cas d'un fond brillant, exactement le même aspect. D'autres phénomènes de renversement déjà observés dans le Soleil, et probablement dus à une couche haute lumineuse, venaient du reste, accréditer l'erreur où se trouvaient naguère presque tous les astronomes.

6. — **Preuves expérimentales**. — Les raisonnements qui précèdent rendaient donc possible l'explication par l'effet Zeeman des dédoublements observés : il ne restait plus qu'à en fournir la preuve. M. Hale l'a obtenue très simplement, en disposant devant la fente d'un puissant spectroscope un nicol et un parallélipipède de Fresnel ; ce dernier instrument joue le rôle d'une lame quart d'onde, c'est-à-dire qu'il transforme la polarisation circulaire en rectiligne, et le nicol interceptant une composante de la lumière incidente donne aux raies d'un doublet de Zeeman des intensités complémentaires. L'examen du système optique ainsi constitué montre aisément que tandis qu'une raie s'éteint, l'autre prend le maximum d'intensité : si l'on

tourne ensuite le nicol de 90°, il semble alors que la raie s'est déplacée.

L'expérience a pleinement réussi ; quand on tournait le nicol de 90°, les raies paraissaient, en effet, changer

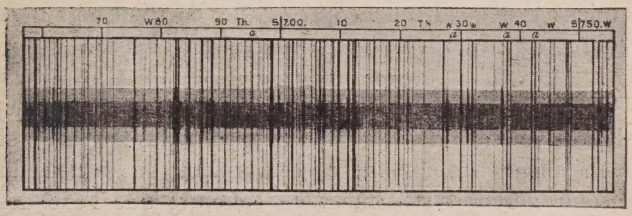


Fig. 47. — Spectre d'une tache (milieu de la figure) dans le jaune.

de position. On a pu, en mesurant leurs déplacements et en les comparant à ceux que les raies artificielles correspondantes donnaient avec des champs connus, déterminer l'intensité magnétique dans les taches : les nombres trouvés oscillent autour de 3 000 unités C. G. S. et ne dépassent pas 4 500.

7. — Pour les taches du bord solaire, on pouvait croire que le phénomène allait changer, puisque l'observation a lieu perpendiculairement aux lignes de force magnétique. On sait en effet que, dans ce dernier cas, les doublets se transforment généralement en triplets, la raie initiale reparaît polarisée rectilignement ; les composantes latérales ne changent pas de position, mais leur polarisation devient rectiligne, identique pour toutes les deux et perpendiculaire à celle de la raie centrale. Au grand étonnement des expérimentateurs, la raie centrale

n'apparut pas dans les taches du bord ; il semblait que l'explication du phénomène fût en défaut. On eut bientôt la clef de l'énigme : les raies étudiées, qui sont celles du fer, ne donnent pas lieu à des triplets, mais par exception la raie centrale elle-même se dédouble; on obtient des quadruplets qui, faute de dispersion, se confondent avec les doublets de tout à l'heure.

8. — M. Hale et ses assistants n'ont d'ailleurs pas tardé à voir des triplets dans le spectre des taches aussi bien que des doublets, et cela même au milieu du disque; on doit seulement en conclure que l'axe des tourbillons n'est pas normal à la surface. L'insuffisance relative des moyens employés n'avait pas permis de reconnaître le fait lors des premières expériences.

Dans un triplet normal observé au laboratoire, la ligne centrale a une intensité double de celle des composantes quand on l'observe perpendiculairement au champ; elle disparaît tout à fait quand on l'observe parallèlement. Cette remarque permet, par des estimations d'intensités d'ailleurs fort délicates, d'apprécier l'angle de l'axe du tourbillon avec la surface solaire, angle en général bien inférieur à 90°. C'est là un fait éminemment favorable à la théorie d'Emden, ainsi que la forme des surfaces de discontinuité étudiées par ce dernier le fait voir aussitôt.

On peut d'ailleurs faire une autre remarque. Les taches se correspondent parfois deux par deux, à la même longitude et avec des latitudes opposées[1] : les observations que rapporte M. Hale auraient montré

[1] Fox et G. Abetti, *Astroph. Journ.*, vol. XXIX, 1909, p. 40.

que dans ce cas les sens de rotation et aussi les champs magnétiques sont inverses. Cette double particularité est également en faveur d'Emden : jusqu'à quel point sera-t-elle confirmée par les recherches ultérieures, il est encore trop tôt pour le dire avec certitude.

9. — **Les orages magnétiques et les champs des taches.** — On pourrait penser, à première vue, que la découverte de Hale va permettre d'expliquer les perturbations magnétiques terrestres ; il faut malheureusement en rabattre. On ne doit pas oublier, en effet, que les champs magnétiques diminuent beaucoup avec l'éloignement, en raison inverse du cube de la distance et non du carré. Aussi M. *Schuster*[1] a-t-il pu calculer que, même si toutes les taches étaient de même polarité au point de vue magnétique, fût-ce à une époque de maximum, la force radiale serait de l'ordre de $4{,}5\ 10^{-6}$ C. G. S. : elle ne serait pas appréciable à nos instruments. Il faut donc, si l'on veut rendre compte des orages magnétiques, chercher autre chose que les champs rotatoires des taches.

LES RECHERCHES NOUVELLES SUR LES COUCHES HAUTES DE L'ATMOSPHÈRE SOLAIRE

1. **Importance des couches supérieures de l'atmosphère du Soleil.** — A quelque théorie que l'on s'arrête, il semble en tout cas fort probable que les influences magnétiques et électriques perceptibles à nos instruments ont leur siège dans les hautes régions

[1] *Nature*, 7 janvier 1909, p. 279.

de l'astre. L'atmosphère solaire doit en effet vraisemblablement absorber la plupart des agents qui ont été proposés. L'action des couches élevées est sans doute de toute façon prédominante.

De plus, si l'on se rappelle tout ce qui précède, nous avons de sérieuses raisons de penser que ces mêmes couches élevées sont fortement ionisées. Les mouvements, quels qu'ils soient, de la matière ainsi électrisée doivent nécessairement engendrer des champs magnétiques. Nous sommes donc, par une voie naturelle, amenés à dire quelques mots des recherches entreprises dans cette direction.

2. **Caractères des diverses couches. Les filaments.** — On n'a longtemps connu du Soleil que ce que nous en voyons dans les lunettes. Le spectroscope, avec la découverte de Janssen et Lockyer, a apporté un certain progrès ; mais c'est surtout l'invention du spectrohéliographe et son application aux raies noires ainsi qu'aux diverses parties de celles-ci qui nous ont révélé l'atmosphère solaire avec ses couches successives [1].

C'est ainsi que M. *Deslandres* a distingué au-dessus de la surface trois couches dans la vapeur de calcium et aussi dans l'hydrogène, ce qui, avec la surface, fait au moins quatre couches superposées. Or, quand on s'élève, les taches qui caractérisent la surface disparaissent ou diminuent progressivement, tandis que,

[1] Voir, pour toutes ces questions : P. Salet, *Spectroscopie astronomique*, E. S., p. 92-110 et p. 256, et H. Deslandres, *C. R.*, 1894, t. CXIX, p. 148, et 1909, t. CLIX, p. 521. La première application aux raies noires et aux différentes parties d'une même raie noire a été faite par Deslandres en 1894.

avec le calcium tout au moins, les plages brillantes (facules et flocculi) augmentent ou vont s'élargissant.

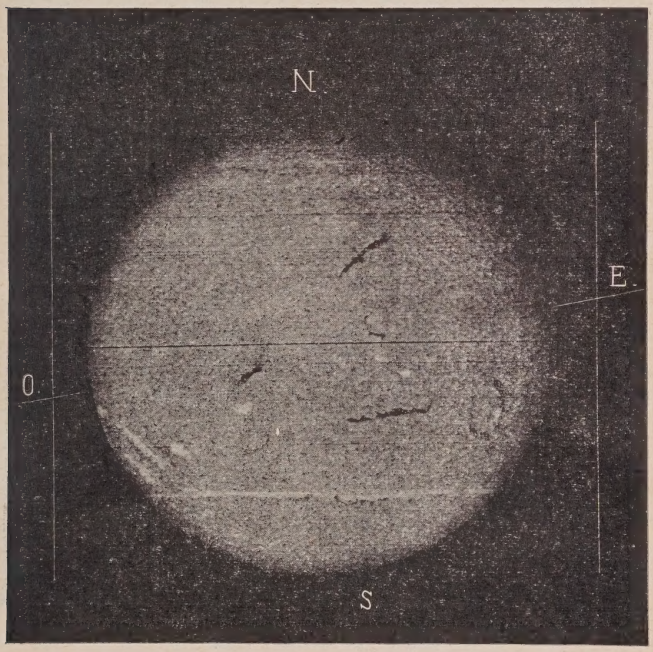


Fig. 48. — Épreuve spectrohéliographique du Soleil obtenue à Meudon avec la raie C de l'hydrogène (15 juin 1909).

D'autre part, un phénomène nouveau fait son apparition : les « filaments », c'est-à-dire des sortes de lignes noires souvent très longues (fig. 48 et 49) et dont l'importance croît avec la hauteur.

3. *Hale et Ellerman*[1] ont signalé les premiers, en 1903 et 1908, quelques filaments (nommés par eux

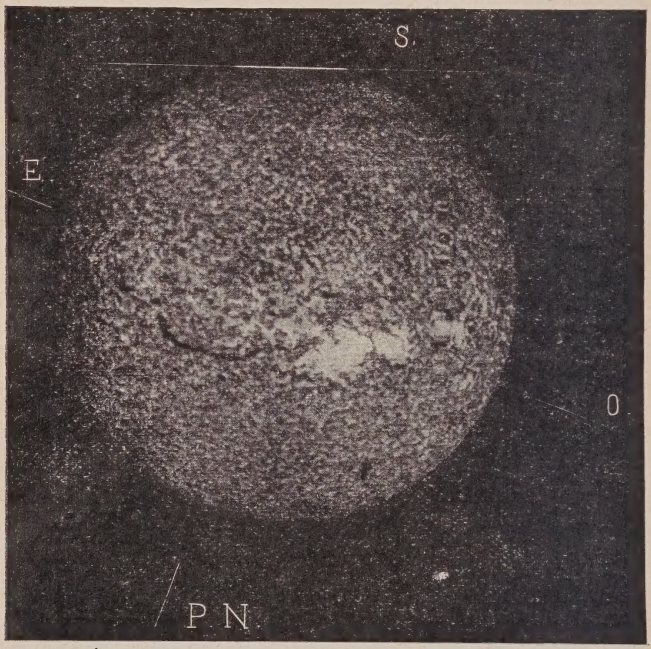


Fig. 49. — Épreuve spectrohéliographique du calcium (couche supérieure K_3). Meudon, 20 novembre 1908.

« longs flocculi noirs ») dans les images des couches moyennes du calcium et de l'hydrogène[2]. Ils les consi-

[1] *Publications of Yerkes Observatory*, vol. III, part. I, et *Astroph. Journal*, vol. XXVIII, 1908, p. 100.

[2] Ces images correspondent en réalité à un mélange des couches moyenne et supérieure; mais la couche moyenne, beaucoup plus intense, est prépondérante. — De son côté, M. Deslandres a publié récemment la liste des principaux filaments visibles sur ses images de la couche moyenne du calcium depuis 1893.

déraient comme des objets curieux, plutôt rares, et ne les séparaient pas des autres flocculi noirs. Plus récemment, à Meudon, *Deslandres* et *d'Azambuja*[1], ayant réussi à isoler dans le calcium et dans l'hydrogène les couches supérieures[2], ont reconnu que les filaments y sont beaucoup plus nombreux et plus développés, surtout avec le calcium.

M. Deslandres a alors annoncé que les filaments noirs caractérisent les couches supérieures et ont une importance au moins égale à celle des taches dont l'aire totale est en général bien inférieure à celle des filaments. Comme les taches, ils persistent au même point pendant plusieurs rotations solaires ; comme elles aussi ils sont souvent accompagnés de protubérances et de grands mouvements ; mais alors que ceux-ci donnent parfois aux taches l'apparence de tourbillons à axe vertical, les mouvements des filaments révélés par le spectre annoncent quelquefois des tourbillons à axe horizontal.

Les filaments se prolongent généralement par des traînées moins nettes, sortes d'alignements plus ou moins interrompus et allant parfois d'un bord à l'autre de l'astre. Souvent aussi, quand les images sont belles, on peut voir des alignements non rattachés à des filaments et formant par leurs croisements en tous sens une sorte de réseau[3]. De plus, filaments et alignements semblent avoir une certaine tendance à suivre, par

[1] *C. R.*, t. CXLVII, 1908, p. 334, et t. CXLIX, 1909, p. 521.

[2] Ces images des couches supérieures obtenues avec le centre même de la raie échappent aux objections tirées de la dispersion anomale.

[3] H. Deslandres, *C. R.*, t. CXLVII, 1908, p. 467.

rapport à l'équateur solaire, des directions privilégiées, faisant entre elles des angles de 120°. Nous verrons plus loin l'importance de cette remarque.

4. Les images de l'hydrogène et du calcium ont des différences notables signalées principalement par M. Hale ; en particulier, l'hydrogène a le caractère suivant, qui ne se trouve pas au même degré avec le calcium : la matière, principalement dans les images se rapportant surtout à la couche moyenne, y semble animée de mouvements plus ou moins désordonnés laissant voir les lignes de courant, apparence que l'on a pu comparer aussi à l'expérience classique du spectre magnétique avec la limaille de fer. Autour des taches, les lignes de courant sont parfois incurvées en spirales. Nous avons vu que c'était là le phénomène qui a conduit Hale à imaginer les tourbillons ionisés et partant les champs magnétiques des taches. Ces mouvements giratoires sont cependant en fait assez contestés [1] aujourd'hui, car ils sont loin d'être visibles chez toutes les taches. C'est à peine si on les observe nettement une fois sur dix. Les mouvements radiaux sont, au contraire, plus généraux [2] ; aussi M. Deslandres pense-t-il que le mouvement de la matière ressemble plutôt à celui d'un liquide s'engouffrant dans un trou : la succion domine ici la giration.

5. **Analogie des « tourbillons cellulaires ».** — Quoi qu'il en soit, on ne peut manquer d'être frappé

[1] H. Deslandres, *C. R.*, t. CXLIX, 1909, p. 493.

[2] Evershed, *The Observatory*, année 1909, p. 291. Evershed trouve à ces mouvements dirigés vers le centre de la tache des vitesses au plus égales à 3 kilomètres par seconde.

de l'analogie remarquable[1] que présentent les phénomènes de la chromosphère supérieure avec ceux observés dans le laboratoire par M. *Bénard*[2]. Ces belles recherches, entreprises il y a déjà quelques années, portaient sur les mouvements d'une couche fluide chauffée par en-dessous et se refroidissant par le haut. On remarque alors que le liquide tend à se partager en petits tourbillons élémentaires[3] appelés aussi cellulaires, et symétriques par rapport à un axe vertical. Ceux-ci, par leur juxtaposition, donnent à la surface libre l'apparence d'une ruche d'abeilles.

Aux frontières de deux tourbillons cellulaires voisins, les mouvements sont verticaux et concordants. Ils sont également verticaux, mais de sens inverse au centre. M. Deslandres rapproche ces apparences des cyclones et anticyclones de l'atmosphère terrestre, une aire de basse pression étant généralement entourée d'aires de haute pression et réciproquement. Le réseau chromosphérique ou des flocculi dans la couche moyenne, le réseau des alignements[4] et filaments dans les couches hautes ne seraient que des indices de la segmentation de la masse fluide en tourbillons cellulaires à grande échelle. Les taches et les facules formeraient les parties centrales des cellules les plus persistantes. Le rapprochement est étayé par les mesures de vitesse radiales

[1] Cette analogie, précisée en 1909 par H. Deslandres (*C. R.*, t. CXLIX, 1909, p. 179 et 493), avait déjà été pressentie par lui en 1908 par comparaison avec l'atmosphère terrestre.

[2] *Revue générale des sciences*, t. XI, 1900, p. 1328.

[3] Rendus visibles à l'aide d'artifices sur lesquels nous n'insisterons pas.

[4] On s'expliquerait ainsi la prédominance chez ceux-ci des angles de 120°.

faites à Meudon avec un spectro-enregistreur spécial : les vitesses verticales sur les facules et sur leur entourage plus sombre sont en effet de sens contraires.

Nous n'avons pas besoin de dire que toutes ces recherches sont peu avancées encore, mais il y a peut-être là, vu l'impuissance relative de l'hydrodynamique théorique, la clef de bien des mystères de l'atmosphère solaire. La météorologie terrestre elle-même a sans doute aussi beaucoup à attendre de ces expériences, — et ce ne serait pas là un de leurs moindres résultats.

CONCLUSION

1. — Il est peut-être téméraire de parler de conclusion à propos d'une science encore à ses débuts et d'un astre dont la plus grande partie, — le noyau, quel qu'en soit la nature, — échappera sans doute éternellement à l'observation humaine. Nous devons en effet songer, chose bien faite pour nous rendre modestes, que nous ne connaissons même pas notre propre globe à plus de deux kilomètres de profondeur. Si l'on ne peut faire sur l'intérieur de la terre et sur l'origine de la chaleur centrale que des hypothèses, combien fragiles doivent être nos conceptions quand il s'agit du Soleil, éloigné de nous par des millions de lieues!

Aussi n'avons-nous pas la prétention de juger en dernier ressort les auteurs dont nous avons exposé les idées, et qui, pour beaucoup, ont été ou sont encore des maîtres de la science. Seul l'avenir dira ce qu'il y a de vrai ici ou là; mais dès maintenant un grand nombre d'objections et de répliques ont pu se faire jour; les quelques réflexions qui vont suivre nous paraissent résulter simplement soit de l'examen d'ensemble des diverses conceptions, soit de l'orientation des idées actuelles.

2. — Il n'y a pas et il ne peut y avoir, — on a dû s'en apercevoir, — de théorie générale du Soleil. Chacune des théories passées en revue se borne à expliquer un ou plusieurs points en laissant de côté le reste et, à vrai dire, les meilleures sont peut-être celles qui expliquent le moins de choses, nous entendons celles qui, pour rendre sérieusement compte d'un fait particulier, se résignent à ne pas les effleurer presque tous sans matériaux suffisants. Le principal écueil est ici d'être superficiel : le sujet n'y prête que trop. On semble d'ailleurs, depuis une quinzaine d'années, avoir compris la vanité de ces vastes synthèses, car leur éclosion s'est sensiblement ralentie.

Nous rangerons dans cette catégorie les théories du début : celles de J. Herschel, Kirchhoff, Zöllner, Secchi, Faye, d'Oppolzer, etc. Les faits sur lesquels elles s'appuient sont presque toujours exacts : nous avons vu que le P. Secchi est, parmi les auteurs cités, celui qui accorde à l'observation la plus large place pour réduire d'autant celle de l'hypothèse. Mais, d'un autre côté, l'interprétation de ces faits a souvent exercé l'imagination aux dépens de la rigueur.

3. — En particulier les théories météorologiques dont Zöllner et d'Oppolzer ont donné des modèles contiennent peut-être une part de vérité, et il y a une similitude générale entre les phénomènes solaires et terrestres. Mais leurs auteurs abusent un peu de courants, de cyclones, de phénomènes de l'atmosphère qu'ils mêlent à ceux de la surface et dont l'observation, à leur époque surtout, n'établissait nullement l'existence.

Cela ne veut pas dire que les courants, tourbillons ou cyclones dont nous parlons n'existent pas du tout dans le Soleil : bien au contraire, les belles recherches récentes de MM. Deslandres, Hale, Evershed mettent en évidence de pareils déplacements des vapeurs solaires en même temps qu'elles font connaître la nature des différentes couches dont se compose l'atmosphère de l'astre. Le spectrohéliographe et les spectro-enregistreurs, qui relèvent les formes et les mouvements de toutes ces vapeurs, nous fixeront sûrement sur de nombreux problèmes nettement délimités de la physique solaire : il est incontestable que la science s'oriente de plus en plus dans cette voie. Seulement il y a loin de ces expériences précises aux vagues courants si en honneur il y a vingt-cinq ou trente ans, et basés uniquement sur des analogies plus ou moins superficielles : on ne faisait au fond que remplacer un mystère par un autre.

4. — De plus les théories météorologiques, et d'une façon générale toutes celles du premier chapitre (même aussi celles du second), ont un autre défaut assez sérieux : elles ne font aucune place aux *forces électriques ou magnétiques* qui jouent certainement un rôle et sans doute un rôle important, non seulement dans la couronne ou dans les actions magnétiques terrestres, mais encore dans les phénomènes solaires qui en paraissent indépendants à première vue (taches, facules, etc.). La grande influence des agents de cette catégorie a été pressentie par plusieurs savants ; leurs travaux font l'objet de notre dernier chapitre : il y a là un champ d'études à peine exploré et qui paraît

plein de promesses. C'est ainsi que, peu de temps après la découverte de l'effet Zeeman, M. Cornu prédisait dans une conférence les progrès que de telles expériences pouvaient valoir à l'astronomie. Or M. Hale vient de mettre en évidence ce curieux phénomène dans les spectres des taches solaires, et l'on est en droit d'espérer que c'est là seulement un premier pas.

5. — Quoi qu'il en soit, un certain nombre de points dans la théorie du Soleil semblent à présent établis. La température superficielle du Soleil gazeux, selon toutes probabilités, est vraisemblablement comprise entre 6000 et 12000°; elle est donc supérieure aux points critiques de toutes les vapeurs connues et tous les corps doivent s'y trouver dissociés, même le carbone. Cette dissociation va-t-elle plus loin que les éléments ultimes envisagés par les chimistes? Lockyer assure que oui, et les arguments qu'il ne se lasse pas de fournir en faveur de ses idées semblent plus philosophiques, sinon beaucoup plus solides que ceux de ses adversaires. Les uns et les autres ont d'ailleurs accumulé dans les deux sens des expériences qui ne prouvent souvent pas grand'chose, limitées qu'elles sont du côté de la température et de la pression. Mais il paraît bien que le grand astronome anglais a découvert une voie féconde, d'ailleurs trop peu explorée encore pour nous permettre d'être plus affirmatifs.

6. — La viscosité intérieure du Soleil est sans doute très grande; les raisonnements de M. See méritent, sur ce sujet tout au moins, d'être retenus : ils n'introduisent, surtout au point de vue qualitatif, aucune hypothèse qui ne soit vraisemblable. L'intérieur du

Soleil doit donc ressembler à un bloc de poix pâteuse dont la viscosité, due en grande partie à la seule gravitation, atteindrait des proportions prodigieuses. On a parfois rattaché à cet état supposé des régions internes la tendance que les taches auraient à se reproduire en certaines régions, comme si les centres d'activité d'où elles émanent se trouvaient groupés sur certains points du Soleil, notamment sur certains méridiens à l'exclusion des autres. Nous avouerons avoir examiné plusieurs séries de graphiques publiés par les auteurs s'étant occupés de la question, et nous n'avons pas trouvé que le phénomène fût très caractérisé. Pourtant on admet en général qu'il y a *tendance* en ce sens; c'est alors une affaire de probabilité où l'appréciation personnelle joue un grand rôle.

7. — Que la photosphère soit constituée, ainsi que le voulait Faye, par une enveloppe de nuages issus des condensations et peut-être des combinaisons qu'amène le refroidissement superficiel, c'est là un point à peu près admis aujourd'hui, sauf par les partisans de Schmidt et de Julius : l'idée soutenue par ces derniers d'une photosphère sans réalité physique et due à une sorte d'illusion d'optique ne tient d'ailleurs pas assez compte de l'absorption, et cette objection, qu'on n'a pas manqué de leur faire, n'a pas été réfutée.

Mais il est, par contre, fort délicat de savoir au juste le rôle joué dans le Soleil par la dispersion anomale. Les mouvements fantastiques des protubérances sont-ils réels ou leurs vitesses radiales ne sont-elles que des illusions dues à ce phénomène? On n'est pas encore définitivement fixé. M. Deslandres estime que la dis-

persion anomale joue probablement un rôle chez les protubérances, mais que ce rôle est faible. Nous croyons aussi plus simple d'admettre l'explication de Döppler-Fizeau, basée sur des faits expérimentaux constatés, indiscutables, et qui a l'avantage d'être mieux d'accord avec les mouvements directement observables des jets protubérantiels. Le jour où les partisans de la dispersion anomale auront établi qu'elle peut, ne serait-ce que dans certaines conditions, se montrer avec une grande intensité au voisinage des raies chromosphériques (hydrogène, hélium, H et K du calcium), mais ce jour-là seulement, il sera sage de se ranger de leur côté, au moins sur ce point particulier ; car un certain nombre de leurs explications sur les taches, la période undécennale, etc., supportent difficilement l'examen.

L'existence des courants de convection dans toute la masse a été, nous l'avons dit, assez discutée pour des raisons variées, notamment par Brester, d'Oppolzer et See. Young a donné récemment là-dessus son opinion[1] : il juge les courants de convection possibles. Nous ne voyons pas, en particulier, si la rigidité est surtout due aux forces de gravitation, pourquoi elle pourrait s'opposer formellement à tout déplacement de matière. Ne peut-il pas y avoir des courants au fond des mers, malgré les pressions énormes qui y règnent ? Nous adopterons donc l'appréciation de Young qui, pour le présent, semble la plus vraisemblable.

8. — Un problème peut-être plus loin encore de sa solution que les précédents est celui de la nature des

[1] *Ciel et Terre*, t. 25, 1904-05, p. 432.

taches. Il faut bien convenir, en effet, qu'aucune des théories proposées jusqu'ici ne les explique d'une manière tout à fait satisfaisante : il semble que plus on avance dans l'étude de la question, plus elle s'obscurcit. On ne peut même affirmer que les taches soient toujours des dépressions de la surface photosphérique par rapport à son niveau voisin, on ne sait pas davantage si elles correspondent à des régions relativement froides ou surchauffées. De toutes les théories émises, celles qui paraissent le mieux s'accorder avec les faits sont celles de Faye et d'Oppolzer ; mais, comme nous l'avons laissé entendre, elles ne font que déplacer la difficulté : tout revient à expliquer, dans le premier cas, les cyclones solaires ; dans le second cas, les courants polaires en spirales. La plupart des astronomes spécialistes semblent disposés à admettre la théorie cyclonique de Faye, malgré les objections sérieuses qu'elle rencontre. Disons encore que l'interprétation d'Emden a gagné quelque terrain à la suite des expériences de Hale sur les champs magnétiques dans les taches. C'est celle qui nous paraît, somme toute, la plus plausible : on a vu qu'elle cadre fort bien avec l'idée avancée par Young d'affaissements locaux de la photosphère, affaissements qui s'expliqueraient ainsi parfaitement.

9. — Les études mathématiques et hydrodynamiques du Soleil ont, en général, la rigueur pour elles : ce sont de rares points fixes dans un sol mouvant. Il ne faudrait cependant pas exagérer outre mesure cet avantage, car tout y dépend des prémisses choisies, et nous ne connaissons guère de propriétés de la matière qui se conservent avec certitude en dehors des limites usuelles

de notre expérience. Les lois physiques sont, pour la plupart, de moins en moins exactes à mesure que l'on s'éloigne des pressions et des températures relativement basses étudiées dans les laboratoires. Ces réserves une fois faites, on ne peut nier, croyons-nous, le grand intérêt du mémoire d'Emden : les principes et les résultats qu'il contient renferment très probablement une grande part de vérité. L'auteur, il est vrai, ne fait pas intervenir le frottement dans ses équations ; mais cette omission ne doit guère entacher sa théorie d'inexactitude que dans les régions profondes de l'astre.

10. — On a cru jadis trouver dans la contraction, suggérée par Helmholtz, une explication définitive de la constance du rayonnement solaire, et cette explication n'avait contre elle que notre impuissance à la déceler. Malheureusement, de toutes les manières qu'on l'envisage, elle ne peut rendre compte de l'énormité des périodes géologiques : c'est tourner un peu légèrement la difficulté que d'accuser le défaut de rigueur des évaluations des géologues ; celles-ci sont en effet concordantes, au moins comme ordre de grandeur, et il faudrait un singulier hasard pour qu'il en soit ainsi d'estimations entièrement illusoires. Un calcul bien suggestif sous ce rapport est celui que nous avons donné de l'énergie potentielle *totale* due à la gravitation et provenant de la contraction progressive de la nébuleuse primitive.

On arrive à peine ainsi à 15 millions d'années de chaleur au taux actuel, en prenant pour constante solaire $2^c,5$, chiffre sûrement très voisin de la vérité. Telle est la quantité maxima d'énergie qui a pu être convertie

en chaleur depuis l'origine, d'après le mécanisme de Helmholtz. C'est évidemment très peu.

De plus, il faut bien le faire remarquer, le principal soutien de la théorie de Helmholtz vient de sa concordance avec une doctrine plus générale, nous voulons parler de la cosmogonie de Laplace. La belle conception, empreinte d'une si majestueuse simplicité, qui termine l'*Exposition du Système du Monde* est aujourd'hui cependant assez discutée : diverses objections, dans le détail desquelles nous n'entrerons pas, se sont élevées contre elle. Pour répondre aux premières en date, on a modifié la théorie ; la chose ne semble plus si facile maintenant. L'hypothèse de Laplace triomphera peut-être de ces difficultés ; peut-être conservera-t-elle longtemps encore dans la science sa faveur passée ; mais le fait qu'elle n'est plus inattaquée, sinon inattaquable, nous interdit de faire appel à son autorité pour appuyer la théorie de Helmholtz en tant qu'ultime explication du rayonnement.

Il est donc bien probable qu'il y a autre chose, et cela que l'on admette ou non la contraction. Si nous ne connaissons pas cette source mystérieuse de chaleur et d'énergie, nous observons du moins des phénomènes qui lui ressemblent. C'est pourquoi nous pensons qu'il faut beaucoup espérer des recherches nouvelles sur la radioactivité et la constitution atomique, bien qu'il soit encore impossible de rien préciser.

11. — L'interprétation la plus courante des variations magnétiques terrestres est celle de M. Schuster. Cependant l'idée d'une action directe du Soleil, que l'on croyait réduite à néant par les objections de lord Kelvin,

paraît regagner actuellement quelque crédit. et nous ne pouvons dissimuler que le système des courants atmosphériques de M. Schuster semble un peu arbitraire et artificiel. D'un autre côté, les arguments de lord Kelvin, qui tiraient leur force du fait que l'énergie solaire était supposée assez limitée, perdent de leur importance si nous admettons que le Soleil constitue un réservoir d'énergie plus prodigieux encore que son rayonnement calorifique ne le laisse penser.

La théorie d'Arrhénius, à laquelle on peut d'ailleurs préférer, en ce qui touche les aurores boréales, celle de Birkeland et pour la couronne celle de Wood ou de Deslandres, a, dès son apparition, suscité dans le monde astronomique un grand intérêt. Elle s'appuie sur des faits récemment introduits dans la science sans doute, mais dont les principaux sont déjà incontestables, et la démonstration expérimentale de la réalité de la pression Maxwell-Bartoli, faite vers 1900, n'a pas peu contribué au succès des conceptions du savant suédois. On étudie depuis quelque temps un phénomène physique, l'émission d'électrons par les corps chauds, qui s'accorderait fort bien avec les idées d'Arrhénius et nous fera peut-être connaître un aspect nouveau de la question. Nous sommes du reste en possession d'une méthode, — la reconnaissance détaillée des diverses couches de l'atmosphère solaire, — qui nous fournit déjà les documents peut-être les plus certains que nous ayons sur le Soleil et qui sera sans doute, là aussi, d'une importance capitale pour le chercheur.

L'intervention des électrons, de plus en plus corroborée par les découvertes récentes, nous paraît appelée d'une façon générale à jeter une vive lumière sur tout

un côté du problème solaire, comme elle l'a déjà fait sur une grande partie de la physique. Il ne faut d'ailleurs pas demander trop tôt aux nouvelles doctrines de tout expliquer sans effort ni contradiction : les électrons ne datent après tout que de dix ans à peine, et encore leur nature intime, leur constitution intérieure nous sont-elles jusqu'ici complètement inconnues. Il serait donc fort injuste de comparer les résultats présents de ces études à ceux de sciences plus avancées qui, comme la mécanique céleste, ont mis deux cents ans ou même davantage avant d'atteindre leur perfection actuelle.

INDEX BIBLIOGRAPHIQUE

Congrès international de physique de 1900 (*Rapports présentés au*). Paris, Gauthier-Villars, 1900.

Encyclopœdia Britannica.

A

Arrhénius (Svante). *Lehrbuch der Kosmichen Physik.* Leipzig, S. Hirzel, 1903.

B

Ball (Sir Robert). 1. *The story of the Heavens.* Londres, Cassell, 3e édition, 1887. In-8°.

— 2. *The story of the Sun.* Londres, Cassell, 1893. In-8°.

Bigelow (Frank H.). *Abstract of a report on Solar and Terrestrial Magnetism in their relations to Meteorology.* U. S. Weather Bureau Washington, 1898.

Brester (Dr A.). *Essai d'une théorie du Soleil et des étoiles variables.* Delft, 1888.

Bunsen. (Voir Kirchhoff.)

C

Chwolson (O. D.). *Traité de Physique.* Traduction Davaux. Paris (en cours de publication). Tomes I et II déjà parus en 1908. Paris, Hermann. In-8°.

Clerke (Miss Agnès). 1. *Problems in Astrophysics.* Londres, A. et C. Black, 1903. In-8°.

— 2. *History of Astronomy during the nineteenth century.* 4e édition, 1902. Londres, Adam et Charles Black. In-8°.

D

DESLANDRES. 1. *Observations de l'éclipse totale du 16 août 1893.* Paris, Gauthier-Villars, 1896.

— 2. *Histoire des idées et des recherches sur le Soleil.* Paris, Gauthier-Villars, 1906.

— 3. *Extrait de l'Annuaire du Bureau des Longitudes pour 1907.*

DUNÉR (N.-C.). *Recherches sur la rotation du Soleil.* Upsal, 1891.

E

EMDEN (R.). *Gaskugeln, Anwendungen der Mechanischen Wärmethorie auf Kosmologische und Meteorologische.* Problem. Leipzig, 1907, B. G. Teubner. In-8°.

F

FAYE (Hervé). *Sur l'origine du Monde.* 2e édition, Paris, Gauthier-Villars.

K

KELVIN (Lord). (Voir Sir WILLIAM THOMSON.)

KÉPLER. *De Stella Nova.* Op. t. II. Francfort, 1859, Heyder et Zimmer.

KIRCHHOFF et BUNSEN. *Abhandlungen.* Berlin, 1861.

KNOPF (O.). *Die Schmidtsche Sonnentheorie.* Iéna, 1893, B. Vopelius.

L

LANGLEY (S.-P.). *Researches on Solar Heat* (a reprint of the *Mont Whitney expedition*). Washington, 1884.

LARMOR (Joseph). *Aether and Matter.* Cambridge, University Press, 1900.

LOCKYER (Sir Norman). 1. *Contributions to Solar Physics.* Londres, Macmillan, 1874.

— 2. *Chemistry of the Sun.* Londres, Macmillan, 1887.

— 3. *L'évolution inorganique.* Bibliothèque scientifique internationale. Paris, Alcan, 1905.

LOCKYER (Sir Norman). 4. *The Sun's place in Nature.* Londres, Macmillan, 1897.

— 5. *The Meteoritic Hypothesis.* Londres, Macmillan, 1890.

LODGE (Sir Oliver). *Sur les Électrons.* Traduction Nugues et Péridier. Paris, Gauthier-Villars. Collection des actualités scientifiques, 1906.

M

MAIRAN (DE). *Les Aurores boréales.* Paris, 1754.

MASCART (E.). *Leçons sur le magnétisme terrestre.* Paris, Gauthier-Villars, 1900.

MAXWELL. *Traité d'électricité et de magnétisme.* Traduction Seligmann-Lui. Paris, Gauthier-Villars, 1889.

MAYER (R.). *Beiträge zur Dynamik des Himmels.* 1848.

MOREUX (Abbé Th.). *Le Problème solaire.* Paris, Bertaux, 1900.

N

NEWCOMB (Simon). *Popular Astronomy.* Londres, 1878, Macmillan.

NORDMANN (Ch.). *Essai sur le rôle des ondes hertziennes en astronomie physique et sur diverses questions qui s'y rattachent.* Thèse de doctorat. Paris, Gauthier-Villars, 1903.

R

RANKINE. *Manuel of the steam-engine and other Prime Movers.* 1859.

RESAL. *Mécanique céleste.* Paris, Gauthier-Villars, 1884.

RUTHERFORD. *Radioactive Transformations.* Londres, Constable, 1906. In-8°.

S

SAINTE-CLAIRE-DEVILLE (E.-H.). *Leçons sur la dissociation professées à la Société chimique.* Paris, 1864.

SALET (Pierre). *Spectroscopie astronomique E. S.* Paris, 1909.

SCHEINER (le Père). *Rosa Ursina,* livre IV. Bracciani, 1630.

SCHEINER (Dr Julius). *Populäre Astrophysik.* Leipzig et Berlin, B. G. Teubner, 1908. In-8°.

SCHELLEN. *Die Spectralanalyse*, t. II, 3e édition, 1883. Brunswick, George Westermann.

SCHMIDT (Dr August). *Die Strahlenbrechung auf der Sonne; ein geometrisches Beitrag zur Sonnenphysik.* Stuttgart, J.-B. Metzler, 1891.

SECCHI (le Père Angelo). *Le Soleil.* Paris, Gauthier-Villars, 1875-1877.

SOCIÉTÉ DE PHYSIQUE. 1. *Ions, Électrons, Corpuscules.* Paris, Gauthier-Villars, 1906.

— 2. *Rapports présentés au Congrès de Physique de 1900.* Paris, Gauthier-Villars, 1900.

SPÖRER. *Beobachtungen der Sonnenflecken,* t. II. Leipzig, 1876, Engelmann.

T

TAIT et THOMSON. *Treatise on Natural Philosophy.* Cambridge, 1883.

THOMSON (J.-J.). 1. *Conduction of Electricity through Gases.* Cambridge, University Press, 2e édition, 1906.

— 2. *Electricity and Matter.* Londres, Constable, 1905. In-8°.

— 3. *The Corpuscular Theory of Matter.* Londres, Constable, 1907.

— 4. *Application of Dynamics to Physics and Chemistry.* Londres, Macmillan, 1888.

THOMSON (Sir William). *Conférences scientifiques et Allocutions.* Traduction P. Lugol avec notes de M. BRILLOUIN. Paris, Gauthier-Villars, 1893. In-8°.

TISSERAND (Félix). *Traité de Mécanique céleste.* Paris, Gauthier-Villars, 1889 à 1896. In-4°.

W

WILLIAMS (Mattieu). *The Fuel of the Sun,* 1860.

WÜRTZ. *Dictionnaire de Chimie.* Paris, Hachette, 1882.

Y

Young (Charles-A.). 1. *General Astronomy*, édition de 1904. Boston et Londres, Ginn.
— 2. *The Sun*, 1883.
— 3. *Le Soleil*. Traduction de la 1re édition de *The Sun*. Bibliothèque scientifique internationale. Paris, Alcan, 1883.

LISTE DES PÉRIODIQUES

ABRÉVIATIONS OU TITRES USUELS

A. N.	*Astronomische Nachrichten.*
Berl. Ber.	*Monatsberichte der Berliner Akademie*, etc.
C. R.	*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences.*
Drudes Annalen.	*Annalen der Physik.*
Münch. Ber.	*Sitzungsberichte der Münchener Akademie*, etc.
Poggendorffs Annalen.	*Annalen der Physik.*
Roy. Soc. Proceedings.	*Proceedings of the Royal Society of London.*
Spett. Ital.	*Memorie della Societa degli Spettroscopisti Italiani.*
Wiedemanns Annalen.	*Annalen der Physik.*

American Journal of Science (*The*). New-Haven (Connecticut), Etats-Unis.

Annalen der Physik (anciennement *Annalen der Physik und Chemie*). Leipzig, Johann Ambrosius Barth.

Annales du Bureau des Longitudes. Paris, Gauthier-Villars.

Annales de Chimie et de Physique. Paris, Masson et Gauthier-Villars.

Annales de l'Observatoire de Nice. Paris, Gauthier-Villars.

Annales de l'Observatoire de Moscou.

Annals of Edinburgh Observatory.

Annuaire du Bureau des Longitudes. Paris, Gauthier-Villars.

Archives néerlandaises des Sciences exactes et naturelles. La Haye, Martinus Nijhoff. In-8°.

Archives des sciences physiques et naturelles. Genève et Paris, Masson.

Astronomical Journal. Boston, S. C. Chandler, Wellesley-Hill (Mass., Etats-Unis).

Astronomische Nachrichten. Kiel, C. Schaidt.

Astronomie (L'). Revue mensuelle d'astronomie populaire, etc. Paris (aux bureaux). Remplacée en 1894 par le *Bulletin de la Société astronomique de France.*

Astronomy and Astrophysics. Prédécesseur de l'*Astrophysical Journal.*

Astrophysical Journal. Chicago, the University Press.

Bulletin de l'Académie des Sciences de Copenhague.

Bulletin des séances de la Société de Physique. Paris (au siège de la Société).

Journal de Physique. Paris (aux bureaux du Journal).

Mémoires de l'Académie des Sciences. Paris.

Memorie della Societa degli Spettroscopisti Italiani. Catane, C. Galatola.

Memoirs of the Royal Astronomical Society. Londres, Roy. Astr. Society Burlington-House.

Mitteilungen der naturforschenden Gesellschaft in Bern. Berne, Huber et Cie.

Monatsberichte der Berliner Akademie. Titre exact : *Sitzungberichte der Königl. Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin.* Berlin, G. Reimer.

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. Londres, Roy. Astr. Society Burlington-House.

Monthly Weather Review.

Nature. Londres, Macmillan.

Nova Acta Regiæ Societatis Scientiarum Upsaliensis. Upsal, Akademische Buchhandlung, S. C. Lundström.

Nuovo Cimento (Il). Pise, Pieraccini.

Philosophical Magazine. Titre complet : *The London Edinburg and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science.* Londres, Taylor and Francis.

Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Londres, Harrison and Sons.

Physikalische Zeitschrift. Leipzig, S. Hirzel. In-4°.

Popular Astronomy. Goodsell Observatory of Carleton College, Northfield, Minnesota (Etats-Unis).

Proceedings of the American Academy of Arts and Science. Boston.

Proceedings of the Royal Irish Academy. Titre exact : *The Scientific Proceedings of the Royal Dublin Society.* Dublin.

Proceedings of the Royal Society of London. Londres, Harrison and Sons.

Revue générale des Sciences. Paris, Armand Colin.

Sirius. Leipzig, E.-H. Mayer.

Sitzungsberichte der Münchener Akademie. Titre exact : *Sitzungsberichte der Kŏnigl. bayerischen Akademie der Wissenschaften zu München.* Munich, G. Franz.

Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity. Cincinnati, Jennings and Graham.

Transactions of the Royal Society of Dublin. Titre exact : *The Scientific Transactions of the Royal Dublin Society.* Dublin. In-4°.

Videnskabsselskabets Skrifter. Titre exact : *Oversigt over det Kgl. danske Videnskabernes Selskabs Forhandlinger* (*Mémoires de l'Académie royale des Sciences de Copenhague*). Copenhague. In-4°.

TABLE ALPHABÉTIQUE DES AUTEURS

A

Abbott. Sur le rayonnement solaire, 125; constante solaire, 133.

Abetti. Correspondance entre taches solaires boréales et australes, 326.

Abney. Spectre solaire infrarouge, 168.

Adams et Hale. Sur la rotation solaire, 70; sur le spectre des taches, 100.

Andrews. État critique des gaz, 156.

Angström (Knut). Constante solaire, 133; absorption des gaz carbonés, 168, note.

Arago. Absence de polarisation de la lumière solaire et de celle des gaz incandescents, 32, 41; taches solaires et météorologie, 248; taches solaires et aurores boréales, 250.

Arrhénius. Période de la rotation solaire, 114; sens de l'électrisation solaire, 284; théorie de la couronne, 274, 287, 300, 304-318; théorie des aurores boréales, 301.

Auwers. Diamètre du Soleil, 73.

Azambuja (D'). Sur l'atmosphère solaire, 331.

B

Balfour-Stewart. Courants descendants dans le Soleil, 48; à propos de l'observation de Carrington, 254; variations du magnétisme terrestre, 266.

Ball (Sir R.). A propos de la contraction solaire, 146, note.

Balmer (Formule de), 282.

Bartoli. (Voyez Maxwell, Pression de la lumière.)

Bauer et Moulin. Constante de la loi de Stefan, 122, note.

Baume-Pluvinel (A. de la). Sur la théorie coronale de Schaeberle, 310, note.

Becquerel (H.). Dispersion anomale, 82.

Belopolsky. Sur la rotation solaire, 70, note.

Bénard. Tourbillons cellulaires, 332.

Bérard. Observation de la chromosphère, 11.

Bigelow (F.-H.). Hypothèse magnétique, 257, note; théorie magnétique, 265-278.

Birkeland (Kr.). Succion des rayons cathodiques, 279-281; théorie des aurores boréales, 301, 313, note; tendance des taches solaires à se reproduire au même endroit, 339.

Bode. Idées sur les taches solaires, 4, note.
Boltzmann. Démonstration de la loi de Stefan, 120.
Bosler (J.). Action solaire sur le magnétisme terrestre, 260, note.
Boys. Radiomicromètre, 123.
Bredikhine. Queues multiples des comètes, 286; types des queues cométaires, 308.
Brester. Théorie solaire, 62-71, 186, note, 340; compression des couches coronales, 297.
Brewster. Impossibilité d'attribuer la couronne à la diffraction, 10.
Brillouin. Sur la rotation solaire, 187, note.
Bunsen. (Voir Kirchhoff.)

C

Cagniard-Latour. État critique des gaz, 156.
Carrington. Loi de la rotation solaire, 21, 36, 43, 44, 54, 70, 228; périodicité des taches, 245, 268; curieux phénomènes dans une tache, 254, 300.
Cassini. Sur la couronne, 9.
Chacornac. Mouvements centripètes dans les taches, 47.
Cornu. Influence possible de l'effet Zeeman en Astronomie, 338.
Cortie. Dissociation des molécules dans le Soleil, 158, note.
Crew. Sur les raies chromosphériques, 70.
Crookes (Sir William). Séparation de l'yttrium en éléments plus simples, 159; matière radiante, 166; spectre ultraviolet du radium, 175.
Crova. Constante solaire, 132.
Curie. Énergie rayonnée par le radium, 171.

D

Darwin (G.-H.). Possibilité du radium dans le Soleil, 171; durée des périodes géologiques, 178, note; équilibre d'une sphère fluide en rotation, 239.
Delisle et Lahire. Hypothèse de la diffraction sur la couronne, 10, note.
Deslandres. Épreuves spectrohéliographiques, 28, 109; hypothèse cathodique, 275, note, 281-289, 295; loi spectrale sur les séries des raies, 159, note; spectres du bord et du centre, 42, note; vitesses des protubérances, 310, note; objection à Arrhénius, 318; sur les filaments, 331; recherches sur l'atmosphère solaire, 327-334.
Deville (Sainte-Claire). Expérience sur la dissociation, 63, 167.
Döppler et Fizeau (Méthode de), 45, 68, 101.
Dulong et Petit. Loi de refroidissement, 118, 120; loi des chaleurs spécifiques, 207.
Duner. Sur la rotation solaire, 45, note, 70, note.

E

Ebert. Expériences sur la dispersion anomale, 93; expériences reproduisant la forme

de la couronne solaire, 274; théorie électromagnétique de la couronne, 289-294.

Ebert et Wiedemann. Luminescence hertzienne des gaz, 303.

Ebert et Wood. (Voir Wood et Ébert.)

Ekholm. Période de la rotation solaire, 114; équilibre interne du Soleil, 232-237.

Ellerman. Sur les filaments, 330.

Ellis. Propagation des orages magnétiques, 314; courbes, 249.

Elster et Geitel. Radioactivité atmosphérique, 176.

Emden. Température relative des pôles et de l'équateur solaires, 20, note; théorie solaire, 97, 103, 112, 187, note, 216-232, 243, 326, 342.

Ericsson. Température du Soleil, 118.

Eve (A.-S.). Radioactivité de la croûte terrestre, 176; des roches, 177.

Evershed. Mouvements radiaux dans les taches, 332, note.

F

Fabricius. Découverte des taches solaires, 2.

Faye (H.). Sur les taches, 26, note, 229; théorie solaire, 31-54, 57, 336; sur l'hypothèse de la combustion solaire, 137; durée passée du Soleil, 150, note; milieu matériel interplanétaire, 166; à propos de l'explication des grains de riz, 233; taches solaires et magnétisme terrestre, 247, note; période de rotation du Soleil, 268.

Fényi (le Père). Observation des protubérances, 106.

Ferrer (Don José de). Sur la couronne, 10.

Féry. Constante de la loi de Stéfan, 122, note; actinomètre électrique, 133.

Fizeau. (Voir Döppler.)

Flamsteed. Idées sur les taches solaires, 4, note.

Forbes. Constante solaire, 132.

Fox. (Voir Abetti.)

Fowler. Sur le spectre de la comète Morehouse, 287, note.

Fraunhofer. Découverte des raies du spectre solaire, 13.

Froude (W.). Expériences sur la résistance de l'air, 168 note.

Frost. Rayonnement des taches solaires, 43, note, 58.

G

Galilée. Découverte des taches solaires, 2; idée primitive sur les taches, 33.

Gautier. Taches solaires et magnétisme terrestre, 247.

Geitel et Elster. (Voir Elster.)

Goldstein. Hypothèse des rayons cathodiques solaires, 279.

Grant. Sur la chromosphère, 12.

Gray et Wilson. (Voir Wilson et Gray.)

Grove (Sir William). Récupération de la chaleur solaire, 161, note.

Guillaume (Ch.-Ed.). Possibilité du radium dans le Soleil, 175, note.

H

Hale (G.). Épreuves spectrohéliographiques, 28, 109; comparaison des spectres du bord solaire et du centre, 42, note; réseau sombre des flocculi d'hydrogène, 111; spectre solaire anormal, 111; curieux phénomène solaire, 254; tourbillons solaires, 319; sur les filaments, 330; effet Zeeman dans le soleil, 57, 318-327, 338.

Hale et Adams. (Voir Adams et Hale.)

Hall (M.). Contraction solaire, 143.

Halm (J.). Sur la rotation solaire, 45, note; période de 65 ans de l'activité solaire, 237, note.

Hansky. Constante solaire, 133.

Hardy (W.-B.). Expériences sur la radioactivité, 173.

Hartmann. Observations sur la théorie de Julius, 82, 89, 95, note, 131, note; sur les flocculi, 110.

Hastings. Théorie de la photosphère, 41.

Helmholtz. Contraction de la masse solaire, 30, 64, 142-150, 150, note, 155, 178, 181, 217, 227, 233, 342; énergie potentielle de gravitation du Soleil, 152.

Herschel (William). Théorie solaire, 3; taches solaires et météorologie, 248.

Herschel (John). Théorie solaire, 6, 38; sur l'état de la photosphère, 33, 70; constante solaire, 116, 117.

Hertz. Oscillations électriques, 290.

Hirn. Température du Soleil, 122; objections à la théorie de Siemens, 167-168.

Hodgson. Observation d'une éruption solaire remarquable, 254, note, 300.

Hull. (Voir Lebedeff.)

Humboldt. Existence d'un gaz interplanétaire, 162.

Huggins (Sir W.). Constitution de la couronne, 282, 297.

J

Janssen. Méthode pour l'observation des protubérances, 35, 67; comparaison des spectres du bord solaire et du centre, 42, note.

Joly. Durée des temps géologiques, 178, note.

Julius. Déplacement des raies protubérantielles, 68, 159; théories optiques, 72-115, 339; expériences sur la dispersion anomale, 84, 106.

K

Kayser et Runge. Séries spectrales, 160, note.

Kelvin (Lord). (Voyez Sir William Thomson.)

Képler. Sur la couronne, 9.

Kirchhoff. Théorie du Soleil, 13, 38, 336; loi de, 13, 16, 39, 41; sur la nature des taches, 33, 48.

Kirchhoff et Bunsen. Sur l'absorption des gaz incandescents, 13; interprétation du spectre solaire, 33.

Knopf. Sur la couche renversante, 79.
Köppen. Taches solaires et météorologie, 248.
Kreil. Perturbations lunaires du magnétisme terrestre, 250, note.
Kummer. Réfractions astronomiques, 73.
Kundt (Expérience de), 73, 82.
Kurlbaum. Constante de la loi de Stéfan, 121, 122 note.

L

Lahire. (Voir Delisle.)
Lalande. Explication des taches, 5.
Lamont (John). Période undécennale du magnétisme terrestre, 245.
Lane (Homer). Densité centrale du Soleil, 149; théorie de, 188-195, 205, 227.
Langley. Rayonnement des taches solaires, 43, note, 58, 66; constante solaire, 122, 132, 171; absorption atmosphérique, 132; distribution de l'énergie dans le spectre solaire, 125; bolomètre, 125; sur l'explication planétaire des taches, 235.
Laplace. Hypothèse cosmogonique, 21, 142; constance de l'année sidérale, 168.
Lebedeff. Pression de radiation, 304.
Le Chatelier. Température du Soleil, 122.
Le Roux. Dispersion anomale, 85.
Littrow. Sur la chromosphère, 12.
Lockyer (Sir Norman). Observation des protubérances, 35, 67; leur action magnétique, 253; théorie météoritique, 38; explication des taches solaires, 54; dissociation, 158, 338; filaments coronaux, 295.
Lœwy. Courants descendants dans les taches, 48.
Louville (De). Sur la couronne, 9, note.
Lummer et Pringsheim. Dispersion anomale de certains métaux, 93, 94; constante de la loi de Wien, 128, note.

M

Mairan (De). Atmosphère du Soleil, 244, note.
Maunder. Période solaire du magnétisme terrestre, 253; propagation des orages magnétiques, 314.
Maraldi. Sur la couronne, 9, note.
Marchand. Loi sur les orages magnétiques, 253.
Maxwell-Hall. Calcul de la contraction solaire, 143.
Maxwell. Champs électrique et magnétique de la lumière, 276, note; pression de la lumière, 275, 304.
Mayer (R.). Hypothèse météoritique, 137.
Millochau. Température effective du Soleil, 133.
Moreux (Abbé). Théorie hyperthermique, 67, note.
Moulin et Bauer. (Voir Bauer.)

N

Newall. Milieu matériel interplanétaire, 162, note.
Newcomb (S.). Anneau d'asté-

roïdes entre Mercure et Vénus, 141, 142, note; durée probable du Soleil, 149; dissociation à l'intérieur du Soleil, 207; sur la théorie coronale de Schœberlé, 310, note.

Newton. Loi approchée du refroidissement, 118, 120; existence d'un milieu matériel interplanétaire, 162.

Nichols et Hull. Pression de radiation, 304.

Nordmann. Taches solaires et météorologie, 248, note; théorie hertzienne, 294-304.

O

Olbers. Origine des astéroïdes, 214.

Oppolzer (Égon d'). Théorie solaire, 54-62, 186, note, 231, 336.

P

Paulsen (Adam). Explication des aurores boréales, 280.

Peirce. Sur l'hypothèse météoritique de Mayer, 142.

Pérot (A.). Sur la rotation solaire, 70.

Peytal (l'Abbé). Sur la chromosphère, 10.

Pouillet. Constante solaire, 116, 132, 135; actinomètre, 117.

Poynting. Constante de la loi de Stéfan, 121, note.

Pringsheim. Nature des spectres gazeux, 67.

Pringsheim et Lummer. (Voyez Lummer.)

Proctor. Sur les taches solaires, 47, note.

Puccianti. Sur la dispersion anomale, 94.

Pupin. Expériences reproduisant les apparences coronales, 274, 292.

R

Respighi. Décharges électriques accompagnant les éruptions volcaniques, 312, note.

Ricco. Propagation des orages magnétiques, 314.

Ritter. Équilibre thermique et hydrodynamique du Soleil, 203.

Rizzo. Constante solaire, 133.

Roche (Ed.). Atmosphère des corps célestes, 295.

Rogovsky. Constitution des atmosphères des corps célestes, 298, note.

Rosetti. Température du Soleil, 120; absorption atmosphérique, 123, 132, note.

Runge et Kayser. (Voir Kayser.)

Rutherford. Énergie calorifique du radium, 172; origine de l'hélium terrestre, 178; influence de la température sur la radioactivité, 179, note.

S

Sabine (Sir Edw.). Taches solaires et magnétisme terrestre, 246, 251; perturbations lunaires du magnétisme terrestre, 250, note.

Sainte-Claire-Deville. (Voyez Deville.)

Salet (P.). Sur la polarisation de la couronne, 299.

Sampson. Théorie de la rotation solaire, 241, 243.

Savelieff. Constante solaire 132.

Schaeberle. Théorie éruptive de la couronne, 69, 310.

Scheiner (le Père). Apparence des taches solaires, 3.

Scheiner (Julius). Objection à la théorie d'Ekholm, 236; expériences sur le rayonnement hertzien du Soleil, 294; constante solaire, 133.

Schmidt (Théorie optique de), 74-82, 339.

Schmidt et Wiedemann. (Voir Wiedemann.)

Schuster. Constitution de l'intérieur du Soleil, 216; hypothèse sur les perturbations du magnétisme terrestre, 259, note, 260-265, 266, 299; objections aux théories d'Arrhénius et de Deslandres, 288; calcul sur l'effet Zeeman dans les taches, 327.

Schwabe. Périodicité des taches 245.

Schwartzschild. Sur la pression de radiation, 307.

Secchi (le Père). Observation des protubérances au moyen âge, 10, note; sur la chromosphère, 12; idées générales sur la constitution du Soleil, 22-31, 336; sur les taches, 43, 66; température du Soleil, 118; absorption dans l'atmosphère solaire, 124; théorie de la dissociation, 155-158.

Seeliger (Von). Sur les réfractions dans le Soleil, 73, 91; objection à la théorie de Schmidt, 81.

See (T.-J.-J.). Impossibilité de courants de convection dans le Soleil, 186, note, 214, 340; équilibre interne du Soleil, 202-216; rigidité et ténacité des corps célestes, 208-214, 241, 308

Sellmaier. Influence des configurations planétaires sur les taches solaires, 235.

Siemens (Werner). Sens de l'électrisation solaire, 284, note.

Siemens (Sir William). Théorie récupératrice, 160-170.

Spencer. Objection à la théorie de Faye, 47, 48; les taches sont des « nuages cycloniques », 49.

Spörer. Mouvements propres des taches, 29; sur la nature des taches, 33, note, 59; loi de répartition des taches, 28, 29, note, 60, 230, 237; sur l'émission des taches, 66; profondeur des taches solaires, 80; période synodique du Soleil, 268; fixité possible des taches sur le noyau solaire, 32, note.

Stannyan (le Capitaine). Observation des protubérances, 10.

Stark (J.). Luminescence à basse température, 318.

Stéfan (Loi de), 120-122, 129, 133.

Stoney (Johnstone). Constitution des atmosphères des corps célestes, 298, note.

Strutt (R.-J.). Possibilité du radium dans le Soleil, 173-174; radioactivité des roches, 177.

Swan. Sur la chromosphère, 12.

T

Tacchini. Décharges électriques accompagnant les éruptions solaires, 312, note; opinion sur les orages magnétiques, 253.

Tait et Thomson. (Voir Sir William Thomson.)

Thomson (J.-J.). Énergie intra-atomique, 170, note; perte d'énergie par radiation, 180, note; recherches sur l'ionisation, 274; pression produite par les rayons cathodiques, 286, note; charge d'un électron négatif, 315.

Thomson (Sir William). Théorie météoritique, 38; température du Soleil, 118; sur l'hypothèse de la combustion solaire, 137; sur l'hypothèse météoritique, 139, note; théorie du refroidissement et de la contraction solaires, 144-148, 217, 227; passé et avenir du Soleil, 148-150, 153, 172; estimation du refroidissement annuel, 150-155; force vive de rotation du Soleil, 169; âge du globe, 176; équilibre d'une masse gazeuse pesante, 195-202, 203; objections contre l'action magnétique directe du Soleil, 257-260, 278.

Töpler. Application de sa méthode, 92.

Trouvelot. Aspect de la chromosphère vers le minimum des taches, 61; observation d'une éruption solaire remarquable, 254, note, 300.

U

Ulloa (Don Antonio d'). Observation des protubérances, 10.

V

Vicaire. Sur la théorie d'Herschel, 12.

Villard. Expériences sur les aurores boréales, 313, note.

Violle. Température effective du Soleil, 119-120, 122; constante solaire, 132.

Vogel (H.-C.). Absorption dans l'atmosphère solaire, 124.

W

Warren de la Rue. Expérience stéréoscopique sur les taches, 32; courants descendants dans les taches, 48.

Waterston. Température du Soleil, 118.

Wellmann. Diamètre du Soleil, 73.

Wiedemann et Ebert. (Voir Ebert.)

Wiedemann et Schmidt. Théorie de la couronne, 298.

Wien (Loi de), 128.

Wilczynski. Sur l'équilibre interne du Soleil, 242.

Williams (Mattieu). Récupération de la chaleur solaire, 142, 161, note.

Wilsing. Sur la raie D_3 de l'hélium, 91; sur la théorie de Julius, 93, 95; sur la périodicité de l'activité solaire, 238-241, 243; expériences sur le rayonnement hertzien du Soleil, 294; sur la rotation solaire, 70, note.

Wilson (C.-T.-R.). A propos de l'ionisation, 274, 312; charge d'un électron négatif, 315.

Wilson (W.-E.). Radium dans le Soleil, 171.

Wilson (W.-E.) et Gray. Tem-

pérature effective du Soleil, 123; absorption atmosphérique, 132, note.

Wilson (A.). Apparence des taches solaires, 2, 32.

Wolf. Configurations planétaires et taches solaires, 235; taches solaires et magnétisme terrestre, 246; taches solaires et météorologie, 248; taches solaires et aurores boréales, 250.

Wood et Ebert. Expériences sur la dispersion anomale, 92.

Wood. Théorie coronale, 299.

Y

Young. Opinion sur les idées d'Oppolzer, 61; sur la chaleur solaire, 137; sur la chute moyenne annuelle des aérolithes, 142; hypothèse des affaissements locaux pour expliquer les taches, 231, 341; observation d'une éruption solaire remarquable, 254, 300; sur les courants de convection solaires, 340.

Z

Zeeman. Phénomène de Zeeman dans le Soleil, 318-327, 337.

Zöllner (Théorie solaire de), 14-22, 38, 336; température du Soleil, 122; existence d'un milieu matériel interplanétaire, 162; force répulsive du Soleil, 309; décharges électriques accompagnant les éruptions solaires, 312, note.

TABLE ALPHABÉTIQUE DES MATIÈRES

A

Absorption par l'atmosphère terrestre, 122, 127, 129-132; par l'atmosphère solaire, 123 125, 134.

Accélération équatoriale du Soleil, 7, 21, 43, 70, 228, 241.

Actinomètre de Pouillet, Violle, etc. (voir ces noms) (Usage de l'), 130.

Activité solaire (Période de l'), 245.

Adiabatique (Équilibre), 55, 181-188, 218.

Age et durée à venir du Soleil, 148-150, 154, 172, 181; des temps géologiques, 177.

Aimantation possible du Soleil, 258, 260, 267 et ss., 278.

Atmosphère solaire, 69; courants (de l'), 59; étude récente, 327 et *passim*.

Aurores boréales, rapport avec les taches du Soleil, 244, note, 250, 301, 313; théories explicatives, 280, 301.

B

Bolomètre, 125.

C

Calcium, raies H et K, 57, 86, 94.

Carbone, présence supposée dans le Soleil, 41.

Cathodique, théorie de la chromosphère et de la couronne, 279-289.

Chaleur spécifique du Soleil, 150, 207.

Champ électromagnétique du Soleil, 244.

Chromosphère, découverte, 10; explication par la dispersion anomale, 85-92; électrisation possible, 281. (Voir aussi *Protubérances*.)

Comètes (Voir *Queues* des).

Constante solaire, définition, 116; valeur, 129-134; fixité relative, 136.

Contraction de la masse solaire. (Voir Théorie de *Helmholtz*.)

Convectif, équilibre, 181-188. (Voir aussi *Adiabatique*.)

Coronium, 24, 283, 285. (Voir aussi *Couronne*.)

Corpuscules. (Voir *Électrons*.)

Couche renversante, 13, 23, 79; critique, 77; diverses couches de l'atmosphère solaire, 22, 327-334.

Couronne, découverte, 9; nature physique, 69, 273; actions électriques, 234; variations périodiques, 8, 275; densité,

70, 282, 297; théorie cathodique, 282-287; électro-magnétique, 289-304; mécanique, 310.
Cyclones solaires, 6, 29, 48, 60, 229, 320.

D

Densité des couches solaires, 193, 202, 205.
Diamètre solaire, variations possibles, 30; variation avec la couleur, 73.
Discontinuité (Surfaces de), 97, 217-226, 326.
Dispersion anomale, 33, note, 68, 73, 82-85, 339.
Dissociation dans le Soleil, 40, 62-71, 155-158; des corps simples (Lockyer), 158-160, 338; dans l'espace interplanétaire (W. Siemens), 160-170; atomique, 170-181.
Durée probable du Soleil. (Voir *Age.*)

E

Éclipses de Soleil, 7; de Sumatra, 95.
Élasticité, coefficient, 209.
Électrisation solaire, 234, 274, 281, 284, 294, 309, 312, note, 315, 337.
Électrons, 170 note, 180, 310-318, 320, 344. (Voir *Ions.*)
Empyréen (Gaz), 5.
Énergie, distribution dans le spectre solaire, 125, 128; intra-atomique, 170.
Entretien de la chaleur solaire, 5, 30, 134-181, 215, 342.
Éruptions solaires, 24-26; de chaleur, 63. (Voir *Protubérances, Facules*, etc.)
État gazeux du Soleil, 32, 41, 182, 188, 196, 208.
Évolution solaire, 45, 233-243; de la matière, 180.

F

Facules (Nature des), 26, 45, 51, 65, 108, 110, 229, 235; relation avec les taches, 36.
Feuilles de saule. (Voir *Granulation.*)
Filaments solaires, 328-332.
Flocculi, 108.
Frottement intérieur du Soleil, 215, 218, 227, 234, 239, 242. (Voir *Viscosité, Rigidité.*)

G

Gegenschein, 311.
Grains de riz. (Voir *Granulation.*)
Granulation, 4, 22, 41, 51, 79, 232.

H

Habitabilité prétendue du Soleil, 4.
Hélium, existence, 24, 52, 92, 179; apparence de la raie D_3, 86, 92.
Hertziennes (Ondes), 289-304.
Hydrogène, éruptions, 24, 52; apparence des raies chromosphériques, 87, 93; réseau chromosphérique, 111.

I

Ionisation de la haute atmosphère, 261, 277; de l'atmosphère solaire, 274, 276, 311, 320. (Voir aussi *Électrons.*)

Isothermique (Équilibre), 55, 183.

L

Loi de... (Voir les noms propres.)

M

Magnétisme terrestre, variations périodiques, 245, 252, 253, 263, 276; orages et perturbations magnétiques, 246, 252-260, 314, 343.
Météoritique, hypothèse pour l'entretien de la chaleur solaire, 137-142; hypothèse cosmogonique.
Météorologie (Influence des taches solaires sur la), 248, 278, 301.
Monoatomique (État), 191, 195, 205, 216.

N

Nébuleuses, évolution, 45; luminescence, 317.
Noyau solaire, 3, 4, 6, 12, 15, 34, 98, 196, 217, 238, 339.

O

Orages magnétiques. (Voir *Magnétisme.*)
Origine du Soleil, 38.

P

Pénombre des taches, 5, 6, 17. (Voir aussi *Taches.*)
Périodicité des taches. (Voir *Taches.*)
Perturbations du magnétisme terrestre. (Voir *Magnétisme.*)
Photosphère, nature physique, 3 et ss., 15, 21 et ss., 32, 41 et ss., 79 et *passim*, 339; formation, 46; décharges électriques, 274.
Planètes, rigidité, 212; ténacité, 214; influence sur le magnétisme terrestre, 251; influence sur l'activité solaire, 235.
Polarisation de la lumière solaire; elle n'existe pas, 32; de la couronne.
Pôles solaires; température relative, 20, 228.
Potentiel de gravitation du Soleil, 152; d'un point de sa masse, 219; pression et température potentielles, 221.
Pression de radiation. (Voir *Maxwell-Bartoli.*)
Protubérances, nature, 10, 18 note, 24, 67, 81, 100-108, 282 et *passim*; éruptives, 24, 310, note; vitesses observées, 24, 68, 106, 159, 339; rapport avec les taches, 35, 48; blanches, 67; quiescentes, 33 note; forme, 104.

Q

Queues des comètes, 165, 286, 305, 308-310.

R

Radioactivité, son influence possible dans le Soleil, 170-181, 343.
Radium. (Voir *Radioactivité.*)
Rayonnement solaire, 134.
Réfraction dans les couches du Soleil, 72-82.

Refroidissement d'un astre, 45, 232; du Soleil, 63, 135, 150-155.
Répartition des taches en latitude, 6, 19. (Voir aussi *Taches.*)
Rigidité du Soleil, 209-213, 237, 338; des planètes, 212.
Rotation du Soleil, loi particulière, 20, 36, 43, 60, 70, 168, 218, 228, 237-243; durée, 49, 114.

S

Spectre solaire, 13; spectre des bords et du centre, 42; spectre anormal, 111; distribution de l'énergie dans le, 126. (Voir aussi Théorie de *Julius.*)
Spectrohéliographe, 28, 109, 319, 328-332.
Spectro-enregistreur des vitesses, 333.

T

Taches solaires (Niveau des), 2, 34, 80; théories sur leur nature, 2, 5, 15, 26, 42, 48, 54, 57, 65, 79, 97, 165, 228, 232, 340; distribution sur le Soleil en latitude, 19, 29, 59, 66, 229; périodicité, 17, 35, 51, 112, 232, 237; mouvements propres, 29, 38; profondeur, 50; spectre, 57, 97, 159, 324; relations générales avec le magnétisme terrestre, 246-248, 285; phénomènes singuliers, 254, 300; champs magnétiques, 318-327, 338.
Telluriques (courants), 257.
Température du Soleil, 30, 40, 116-134, 202, 206; des taches, 43, 48, 58, 65, 341; des couches successives du Soleil, 55, 188, 202, 206; effective, 119; de la couronne, 295.
Ténacité du Soleil et des planètes par suite de leur gravité, 213.
Théorie, chercher l'épithète ou le nom propre (Index des Auteurs).
Tourbillons dans le Soleil, 48, 60, 97, 103, 227, 228, 232, 320, 331, 332. (Voir aussi *Cyclones.*)

V

Variations du rayonnement solaire, 165, 243, 248; du magnétisme terrestre. (Voir *Magnétisme.*)
Viscosité du Soleil. (Voir *Rigidité.*) Explication de la période undécennale, 239.
Vitesse des molécules solaires, 194, 208.

Z

Zodiacale (Lumière), 9, 24, 141, 165.

TABLE SYSTÉMATIQUE DES MATIÈRES

CHAPITRE I

THÉORIES GÉNÉRALES SUR LA CONSTITUTION DU SOLEIL

Introduction : Résumé des anciennes théories jusque vers 1860. — Idées d'*Herschel*, de *Kirchhoff*. — Théories de *Zöllner*, du Père *Secchi*, de *Faye* : explication cyclonique des taches. — Théorie météorologique de d'*Oppolzer*. — Théorie de *Brester* 1

CHAPITRE II

THÉORIES OPTIQUES DE SCHMIDT ET DE JULIUS

Le Soleil ne serait qu'une vaste illusion d'optique. — Explication des phénomènes solaires par la réfraction circulaire et la dispersion anomale. — Critiques soulevées par les idées précédentes. 72

CHAPITRE III

TEMPÉRATURE DU SOLEIL ET ENTRETIEN DE SON RAYONNEMENT CALORIFIQUE

Historique des recherches modernes sur la température solaire : la loi de *Stéfan* et les travaux de *Langley*. — Mesure de la constante solaire. — Constance apparente du rayonnement et

nécessité de son entretien. — Hypothèse de la combustion de la chute des astéroïdes (*Mayer*). — Hypothèse de la contraction : *Helmholtz* et Sir *W. Thomson*. — Influence de la dissociation : théorie récupératrice de Sir *W. Siemens*. — Origine intra-atomique possible du rayonnement : recherches toutes récentes anglo-américaines 116

CHAPITRE IV

ÉQUILIBRE DYNAMIQUE ET THERMIQUE DU SOLEIL

Mémoire de *Homer Lane*. — Travaux de Sir *W. Thomson* et de *T.-J.-J. See*. — Théorie mathématique d'*Emden*. — Théorie d'*Ekholm* sur la périodicité des taches et la viscosité. — Explication de la périodicité et de l'accélération équatoriale par *Wilsing* et *Sampson*. — Théorie de *Wilczynski*. 182

CHAPITRE V

LE CHAMP ÉLECTROMAGNÉTIQUE DU SOLEIL ET LES THÉORIES DE LA COURONNE

Influence électromagnétique du Soleil. — Perturbations undécennales du magnétisme terrestre. — Nature probable de ces influences. — Théorie de *Schuster*. — Théorie magnétique de *Bigelow*. — Théorie cathodique de *Deslandres*. — Théorie électromagnétique : *Ebert* et *Nordmann*. — Théorie d'*Arrhénius* : rôle de la pression de radiation. — Expériences de *Hale* sur les champs magnétiques dans les taches solaires. — Recherches récentes entreprises à Meudon sur la haute atmosphère solaire 244

CONCLUSION. 335

INDEX BIBLIOGRAPHIQUE 347

TABLE ALPHABÉTIQUE DES AUTEURS. 355

TABLE ALPHABÉTIQUE DES MATIÈRES 365

TABLE SYSTÉMATIQUE DES MATIÈRES 369

OCTAVE DOIN ET FILS, ÉDITEURS, 8, PLACE DE L'ODÉON, PARIS

ENCYCLOPÉDIE SCIENTIFIQUE

Publiée sous la direction du Dr TOULOUSE

Nous avons entrepris la publication, sous la direction générale de son fondateur, le Dr Toulouse, Directeur à l'École des Hautes-Études, d'une ENCYCLOPÉDIE SCIENTIFIQUE de langue française dont on mesurera l'importance à ce fait qu'elle est divisée en 40 sections ou Bibliothèques et qu'elle comprendra environ 1000 volumes. Elle se propose de rivaliser avec les plus grandes encyclopédies étrangères et même de les dépasser, tout à la fois par le caractère nettement scientifique et la clarté de ses exposés, par l'ordre logique de ses divisions et par son unité, enfin par ses vastes dimensions et sa forme pratique.

I

PLAN GÉNÉRAL DE L'ENCYCLOPÉDIE

Mode de publication. — L'*Encyclopédie* se composera de monographies scientifiques, classées méthodiquement et formant dans leur enchaînement un exposé de toute la science. Organisée sur un plan systématique, cette Encyclopédie, tout en évitant les inconvénients des Traités, — massifs, d'un prix global élevé, difficiles à consulter, — et les inconvénients des Dictionnaires, — où les articles scindés irrationnellement, simples chapitres alphabétiques, sont toujours nécessairement incomplets, — réunira les avantages des uns et des autres.

Du Traité, l'*Encyclopédie* gardera la supériorité que possède

un ensemble complet, bien divisé et fournissant sur chaque science tous les enseignements et tous les renseignements qu'on en réclame. Du Dictionnaire, l'*Encyclopédie* gardera les facilités de recherches par le moyen d'une table générale, l'*Index de l'Encyclopédie*, qui paraîtra dès la publication d'un certain nombre de volumes et sera réimprimé périodiquement. L'*Index* renverra le lecteur aux différents volumes et aux pages où se trouvent traités les divers points d'une question.

Les éditions successives de chaque volume permettront de suivre toujours de près les progrès de la science. Et c'est par là que s'affirme la supériorité de ce mode de publication sur tout autre. Alors que, sous sa masse compacte, un traité, un dictionnaire ne peut être réédité et renouvelé que dans sa totalité et qu'à d'assez longs intervalles, inconvénients graves qu'atténuent mal des suppléments et des appendices, l'*Encyclopédie scientifique*, au contraire, pourra toujours rajeunir les parties qui ne seraient plus au courant des derniers travaux importants. Il est évident, par exemple, que si des livres d'algèbre ou d'acoustique physique peuvent garder leur valeur pendant de nombreuses années, les ouvrages exposant les sciences en formation, comme la chimie physique, la psychologie ou les technologies industrielles, doivent nécessairement être remaniés à des intervalles plus courts.

Le lecteur appréciera la souplesse de publication de cette *Encyclopédie*, toujours vivante, qui s'élargira au fur et à mesure des besoins dans le large cadre tracé dès le début, mais qui constituera toujours, dans son ensemble, un traité complet de la Science, dans chacune de ses sections un traité complet d'une science, et dans chacun de ses livres une monographie complète. Il pourra ainsi n'acheter que telle ou telle section de l'*Encyclopédie*, sûr de n'avoir pas des parties dépareillées d'un tout.

L'*Encyclopédie* demandera plusieurs années pour être achevée ; car pour avoir des expositions bien faites, elle a pris ses collaborateurs plutôt parmi les savants que parmi les professionnels de la rédaction scientifique que l'on retrouve généralement dans les œuvres similaires. Or les savants écrivent peu et lentement : et il est préférable de laisser temporairement sans attribution certains ouvrages plutôt que de les confier à des auteurs insuffisants. Mais cette lenteur et ces vides ne présenteront pas d'in-

convénients, puisque chaque livre est une œuvre indépendante et que tous les volumes publiés sont à tout moment réunis par l'*Index de l'Encyclopédie*. On peut donc encore considérer l'Encyclopédie comme une librairie, où les livres soigneusement choisis, au lieu de représenter le hasard d'une production individuelle, obéiraient à un plan arrêté d'avance, de manière qu'il n'y ait ni lacune dans les parties ingrates, ni double emploi dans les parties très cultivées.

Caractère scientifique des ouvrages. — Actuellement, les livres de science se divisent en deux classes bien distinctes : les livres destinés aux savants spécialisés, le plus souvent incompréhensibles pour tous les autres, faute de rappeler au début des chapitres les connaissances nécessaires, et surtout faute de définir les nombreux termes techniques incessamment forgés, ces derniers rendant un mémoire d'une science particulière inintelligible à un savant qui en a abandonné l'étude durant quelques années ; et ensuite les livres écrits pour le grand public, qui sont sans profit pour des savants et même pour des personnes d'une certaine culture intellectuelle.

L'*Encyclopédie scientifique* a l'ambition de s'adresser au public le plus large. Le savant spécialisé est assuré de rencontrer dans les volumes de sa partie une mise au point très exacte de l'état actuel des questions ; car chaque Bibliothèque, par ses techniques et ses monographies, est d'abord faite avec le plus grand soin pour servir d'instrument d'études et de recherches à ceux qui cultivent la science particulière qu'elle représente, et sa devise pourrait être : *Par les savants, pour les savants.* Quelques-uns de ces livres seront même, par leur caractère didactique, destinés à devenir des ouvrages classiques et à servir aux études de l'enseignement secondaire ou supérieur. Mais, d'autre part, le lecteur non spécialisé est certain de trouver, toutes les fois que cela sera nécessaire, au seuil de la section, — dans un ou plusieurs volumes de généralités, — et au seuil du volume, — dans un chapitre particulier, — des données qui formeront une véritable introduction le mettant à même de poursuivre avec profit sa lecture. Un vocabulaire technique, placé, quand il y aura lieu, à la fin du volume, lui permettra de connaître toujours le sens des mots spéciaux.

II

ORGANISATION SCIENTIFIQUE

Par son organisation scientifique, l'*Encyclopédie* paraît devoir offrir aux lecteurs les meilleures garanties de compétence. Elle est divisée en Sections ou Bibliothèques, à la tête desquelles sont placés des savants professionnels spécialisés dans chaque ordre de sciences et en pleine force de production, qui, d'accord avec le Directeur général, établissent les divisions des matières, choisissent les collaborateurs et acceptent les manuscrits. Le même esprit se manifestera partout : éclectisme et respect de toutes les opinions logiques, subordination des théories aux données de l'expérience, soumission à une discipline rationnelle stricte ainsi qu'aux règles d'une exposition méthodique et claire. De la sorte, le lecteur, qui aura été intéressé par les ouvrages d'une section dont il sera l'abonné régulier, sera amené à consulter avec confiance les livres des autres sections dont il aura besoin, puisqu'il sera assuré de trouver partout la même pensée et les mêmes garanties. Actuellement, en effet, il est, hors de sa spécialité, sans moyen pratique de juger de la compétence réelle des auteurs.

Pour mieux apprécier les tendances variées du travail scientifique adapté à des fins spéciales, l'*Encyclopédie* a sollicité, pour la direction de chaque Bibliothèque, le concours d'un savant placé dans le centre même des études du ressort. Elle a pu ainsi réunir des représentants des principaux Corps savants, Établissements d'enseignement et de recherches de langue française :

Institut.
Académie de Médecine.

Collège de France.
Muséum d'Histoire naturelle.
École des Hautes-Études.
Sorbonne et École normale.
Facultés des Sciences.
Facultés des Lettres.
Facultés de Médecine.
Instituts Pasteur.
École des Ponts et Chaussées.
École des Mines.
École Polytechnique.
Conservatoire des Arts et Métiers.
École d'Anthropologie.
Institut National agronomique.
École vétérinaire d'Alfort.
École supérieure d'Électricité.
École de Chimie industrielle de Lyon.
École des Beaux-Arts.
École des Sciences politiques.

Observatoire de Paris.
Hôpitaux de Paris.

III

BUT DE L'ENCYCLOPÉDIE

Au XVIII^e^ siècle, « l'Encyclopédie » a marqué un magnifique mouvement de la pensée vers la critique rationnelle. A cette époque, une telle manifestation devait avoir un caractère philosophique. Aujourd'hui, l'heure est venue de renouveler ce grand effort de critique, mais dans une direction strictement scientifique; c'est là le but de la nouvelle *Encyclopédie.*

Ainsi la science pourra lutter avec la littérature pour la direction des esprits cultivés, qui, au sortir des écoles, ne demandent guère de conseils qu'aux œuvres d'imagination et à des encyclopédies où la science a une place restreinte, tout à fait hors de proportion avec son importance. Le moment est favorable à cette tentative ; car les nouvelles générations sont plus instruites dans l'ordre scientifique que les précédentes. D'autre part, la science est devenue, par sa complexité et par les corrélations de ses parties, une matière qu'il n'est plus possible d'exposer sans la collaboration de tous les spécialistes, unis là comme le sont les producteurs dans tous les départements de l'activité économique contemporaine.

A un autre point de vue, l'*Encyclopédie,* embrassant toutes les manifestations scientifiques, servira comme tout inventaire à mettre au jour les lacunes, les champs encore en friche ou abandonnés, — ce qui expliquera la lenteur avec laquelle certaines sections se développeront, — et suscitera peut-être les travaux nécessaires. Si ce résultat est atteint, elle sera fière d'y avoir contribué.

Elle apporte en outre une classification des sciences et, par ses divisions, une tentative de mesure, une limitation de chaque domaine. Dans son ensemble, elle cherchera à refléter exactement le prodigieux effort scientifique du commencement de ce siècle et un moment de sa pensée, en sorte que dans l'avenir elle reste le document principal où l'on puisse retrouver et consulter le témoignage de cette époque intellectuelle.

On peut voir aisément que l'*Encyclopédie* ainsi conçue, ainsi réalisée, aura sa place dans toutes les bibliothèques publiques, universitaires et scolaires, dans les laboratoires, entre les mains

des savants, des industriels et de tous les hommes instruits qui veulent se tenir au courant des progrès, dans la partie qu'ils cultivent eux-mêmes ou dans tout le domaine scientifique. Elle fera jurisprudence, ce qui lui dicte le devoir d'impartialité qu'elle aura à remplir.

Il n'est plus possible de vivre dans la société moderne en ignorant les diverses formes de cette activité intellectuelle qui révolutionne les conditions de la vie ; et l'interdépendance de la science ne permet plus aux savants de rester cantonnés, spécialisés dans un étroit domaine. Il leur faut, — et cela leur est souvent difficile, — se mettre au courant des recherches voisines. A tous, l'*Encyclopédie* offre un instrument unique dont la portée scientifique et sociale ne peut échapper à personne.

IV

CLASSIFICATION DES MATIÈRES SCIENTIFIQUES

La division de l'*Encyclopédie* en Bibliothèques a rendu nécessaire l'adoption d'une classification des sciences, où se manifeste nécessairement un certain arbitraire, étant donné que les sciences se distinguent beaucoup moins par les différences de leurs objets que par les divergences des aperçus et des habitudes de notre esprit. Il se produit en pratique des interpénétrations réciproques entre leurs domaines, en sorte que, si l'on donnait à chacun l'étendue à laquelle il peut se croire en droit de prétendre, il envahirait tous les territoires voisins ; une limitation assez stricte est nécessitée par le fait même de la juxtaposition de plusieurs sciences.

Le plan choisi, sans viser à constituer une synthèse philosophique des sciences, qui ne pourrait être que subjective, a tendu pourtant à échapper dans la mesure du possible aux habitudes traditionnelles d'esprit, particulièrement à la routine didactique, et à s'inspirer de principes rationnels.

Il y a deux grandes divisions dans le plan général de l'*Encyclopédie :* d'un côté, les sciences pures, et, de l'autre, toutes les technologies qui correspondent à ces sciences dans la sphère des applications. A part et au début, une Bibliothèque d'introduc-

tion générale est consacrée à la philosophie des sciences (histoire des idées directrices, logique et méthodologie).

Les sciences pures et appliquées présentent en outre une division générale en sciences du monde inorganique et en sciences biologiques. Dans ces deux grandes catégories, l'ordre est celui de particularité croissante, qui marche parallèlement à une rigueur décroissante. Dans les sciences biologiques pures enfin, un groupe de sciences s'est trouvé mis à part, en tant qu'elles s'occupent moins de dégager des lois générales et abstraites que de fournir des monographies d'êtres concrets, depuis la paléontologie jusqu'à l'anthropologie et l'ethnographie.

Étant donné les principes rationnels qui ont dirigé cette classification, il n'y a pas lieu de s'étonner de voir apparaître des groupements relativement nouveaux, une biologie générale, — une physiologie et une pathologie végétales, distinctes aussi bien de la botanique que de l'agriculture, — une chimie physique, etc.

En revanche, des groupements hétérogènes se disloquent pour que leurs parties puissent prendre place dans les disciplines auxquelles elles doivent revenir. La géographie, par exemple, retourne à la géologie, et il y a des géographies botanique, zoologique, anthropologique, économique, qui sont étudiées dans la botanique, la zoologie, l'anthropologie, les sciences économiques.

Les sciences médicales, immense juxtaposition de tendances très diverses, unies par une tradition utilitaire, se désagrègent en des sciences ou des techniques précises ; la pathologie, science de lois, se distingue de la thérapeutique ou de l'hygiène, qui ne sont que les applications des données générales fournies par les sciences pures, et à ce titre mises à leur place rationnelle.

Enfin, il a paru bon de renoncer à l'anthropocentrisme qui exigeait une physiologie humaine, une anatomie humaine, une embryologie humaine, une psychologie humaine. L'homme est intégré dans la série animale dont il est un aboutissant. Et ainsi, son organisation, ses fonctions, son développement, s'éclairent de toute l'évolution antérieure et préparent l'étude des formes plus complexes des groupements organiques qui sont offerts par l'étude des sociétés.

On peut voir que, malgré la prédominance de la préoccupation pratique dans ce classement des Bibliothèques de l'*Encyclopédie scientifique*, le souci de situer rationnellement les sciences dans leurs rapports réciproques n'a pas été négligé. Enfin il est à peine besoin d'ajouter que cet ordre n'implique nullement une hiérarchie, ni dans l'importance ni dans les difficultés des diverses sciences. Certaines, qui sont placées dans la technologie, sont d'une complexité extrême, et leurs recherches peuvent figurer parmi les plus ardues.

Prix de la publication. — Les volumes, illustrés pour la plupart, seront publiés dans le format in-18 jésus et cartonnés. De dimensions commodes, ils auront 400 pages environ, ce qui représente une matière suffisante pour une monographie ayant un objet défini et important, établie du reste selon l'économie du projet qui saura éviter l'émiettement des sujets d'exposition. Le prix étant fixé uniformément à 5 francs, c'est un réel progrès dans les conditions de publication des ouvrages scientifiques, qui, dans certaines spécialités, coûtent encore si cher.

TABLE DES BIBLIOTHÈQUES

DIRECTEUR : Dr TOULOUSE, Directeur de Laboratoire à l'École des Hautes Études.

SECRÉTAIRE GÉNÉRAL : H. PIÉRON, agrégé de l'Université.

DIRECTEURS DES BIBLIOTHÈQUES :

1. *Philosophie des Sciences.* P. PAINLEVÉ, de l'Institut, professeur à la Sorbonne.

I. SCIENCES PURES

A. Sciences mathématiques :

2. *Mathématiques* . . . J. DRACH, professeur à la Faculté des Sciences de l'Université de Toulouse.
3. *Mécanique* . . . . . J. DRACH, professeur à la Faculté des Sciences de l'Université de Toulouse.

B. Sciences inorganiques :

4. *Physique.* . . . . . A. LEDUC, professeur adjoint de physique à la Sorbonne.
5. *Chimie physique.* . . J. PERRIN, professeur de Chimie physique à la Sorbonne.
6. *Chimie* . . . . . A. PICTET, professeur à la Faculté des Sciences de l'Université de Genève.
7. *Astronomie et Physique céleste.* . . . . . J. MASCART, astronome adjoint à l'Observatoire de Paris.
8. *Météorologie* . . . . B. BRUNHES, professeur à la Faculté des Sciences de l'Université de Clermont-Ferrand, directeur de l'Observatoire du puy de Dôme.
9. *Minéralogie et Pétrographie* . . . . . A. LACROIX, de l'Institut, professeur au Muséum d'Histoire naturelle.
10. *Géologie* . . . . . M. BOULE, professeur au Muséum d'Histoire naturelle.

11. *Océanographie physique.*	J. RICHARD, directeur du Musée Océanographique de Monaco.

C. Sciences biologiques normatives :

12. *Biologie.*	A. *Biologie générale.*	M. CAULLERY, professeur de zoologie à la Sorbonne.
	B. *Océanographie biologique.*	J. RICHARD, directeur du Musée Océanographique de Monaco.
13. *Physique biologique.* .		A. IMBERT, professeur à la Faculté de Médecine de l'Université de Montpellier.
14. *Chimie biologique* . .		G. BERTRAND, professeur de chimie biologique à la Sorbonne, chef de service à l'Institut Pasteur.
15. *Physiologie et Pathologie végétales* . . .		L. MANGIN, de l'Institut, professeur au Muséum d'Histoire naturelle.
16. *Physiologie.*		J.-P. LANGLOIS, professeur agrégé à la Faculté de Médecine de Paris.
17. *Psychologie.*		E. TOULOUSE, directeur de Laboratoire à l'École des Hautes Études, médecin en chef de l'asile de Villejuif.
18. *Sociologie*		G. RICHARD, professeur à la Faculté des Lettres de l'Université de Bordeaux.

---

19. *Microbiologie et Parasitologie*		A. CALMETTE, professeur à la Faculté de Médecine de l'Université, directeur de l'Institut Pasteur de Lille; et F. BEZANÇON, professeur agrégé à la Faculté de Médecine de Paris, médecin des Hôpitaux.
20. *Pathologie.*	A. *Pathologie médicale.*	M. KLIPPEL, médecin des Hôpitaux de Paris.
	B. *Neurologie.*	E. TOULOUSE, directeur de Laboratoire à l'École des Hautes Études, médecin en chef de l'asile de Villejuif.
	C. *Path. chirurgicale.*	L. PICQUÉ, chirurgien des Hôpitaux de Paris.

D. Sciences biologiques descriptives :

21. *Paléontologie*	M. BOULE, professeur au Muséum d'Histoire naturelle.

22. *Botanique.*	A. *Généralités phanérogames.*	H. LECOMTE, professeur au Muséum d'Histoire naturelle.
	B. *Cryptogames.* . .	L. MANGIN, de l'Institut, professeur au Muséum d'Histoire naturelle.
23. *Zoologie*		G. LOISEL, directeur de Laboratoire à l'École des Hautes Études.
24. *Anatomie et Embryologie*		G. LOISEL, directeur de Laboratoire à l'École des Hautes Études.
25. *Anthropologie et Ethnographie*		G. PAPILLAULT, directeur adjoint du Laboratoire d'Anthropologie à l'École des Hautes Études, professeur à l'École d'Anthropologie.
26. *Économie politique* . .		D. BELLET, secrétaire perpétuel de la Société d'Economie politique, professeur à l'École des Sciences politiques.

II. SCIENCES APPLIQUÉES

A. Sciences mathématiques :

27. *Mathématiques appliquées*	M. D'OCAGNE, professeur à l'École des Ponts et Chaussées, répétiteur à l'École Polytechnique.
28. *Mécanique appliquée et génie*	M. D'OCAGNE, professeur à l'École des Ponts et Chaussées, répétiteur à l'École Polytechnique.

B. Sciences inorganiques :

29. *Industries physiques* .	H. CHAUMAT, sous-directeur de l'École supérieure d'Électricité de Paris.
30. *Photographie*	A. SEYEWETZ, sous-directeur de l'École de Chimie industrielle de Lyon.
31. *Industries chimiques.* .	J. DERÔME, professeur agrégé de physique au collège Chaptal, inspecteur des Établissements classés.
32. *Géologie et minéralogie appliquées*	L. CAYEUX, professeur à l'Institut national agronomique, professeur de géologie à l'École des Mines.
33. *Construction*	J. PILLET, professeur au Conservatoire des Arts et Métiers et à l'École des Beaux-Arts.

C. Sciences biologiques :

34. *Industries biologiques.*	G. BERTRAND, professeur de chimie biologique à la Sorbonne, chef de service à l'Institut Pasteur.
35. *Botanique appliquée et agriculture*	H. LECOMTE, professeur au Muséum d'Histoire naturelle.
36. *Zoologie appliquée* . .	J. PELLEGRIN, assistant au Muséum d'Histoire naturelle.
37. *Thérapeutique générale et pharmacologie.* .	G. POUCHET, membre de l'Académie de médecine, professeur à la Faculté de Médecine de l'Université de Paris.
38. *Hygiène et médecine publiques*	A. CALMETTE, professeur à la Faculté de Médecine de l'Université, directeur de l'Institut Pasteur de Lille.
39. *Psychologie appliquée.*	E. TOULOUSE, directeur de Laboratoire à l'École des Hautes Études, médecin en chef de l'asile de Villejuif.
40. *Sociologie appliquée.* .	TH. RUYSSEN, professeur à la Faculté des Lettres de l'Université de Bordeaux.

M. ALBERT MAIRE, bibliothécaire à la Sorbonne, est chargé de l'*Index* de l'Encyclopédie scientifique.

34199. — Tours, impr. Mame.

UNIVERSITY OF TORONTO
LIBRARY

Do not
remove
the card
from this
Pocket.

Acme Library Card Pocket
Under Pat. "Ref. Index File."
Made by LIBRARY BUREAU, Boston

Author Bosler, J.

Title Les théories modernes du doleil.

Astron.